

1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
PHYSICS
LIBRARY



SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DE PHYSIQUE.

ANNÉE 1894.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS,
20981 Quai des Grands-Augustins, 55.

SÉANCES

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE,

RECONNUE COMME ÉTABLISSEMENT D'UTILITÉ PUBLIQUE
PAR DÉCRET DU 15 JANVIER 1881.

ANNÉE 1894.

PARIS,

AU SIÈGE DE LA SOCIÉTÉ,

44, RUE DE RENNES, 44.

—

1894

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE.

SÉANCE DU 5 JANVIER 1894.

PRÉSIDENCE DE M. LIPPMANN.

Sont élus Membres de la Société :

MM. DE COPPET, Villa Irène, à Nice.
MASSE (Maurice), ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, à Nice.
STACKELBERG (le Baron Édouard de), Professeur à l'Université de Dorpat (Russie).

M. le PRÉSIDENT déclare le scrutin ouvert pour la nomination du Vice-Président, du Vice-Secrétaire, de deux membres pour la Commission du *Bulletin* et pour le renouvellement partiel du Conseil.

M. le PRÉSIDENT rappelle que le Rapport de la Commission des Comptes sur l'exercice 1893 a été adressé à tous les membres de la Société et demande s'il y a quelques observations à faire à ce Rapport. Personne ne demandant la parole, le Rapport de la Commission des Comptes est mis aux voix et adopté.

M. le PRÉSIDENT proclame le résultat du vote. Sont élus :

MM. CAILLETET, *Vice-Président.*
POINCARÉ, *Vice-Secrétaire.*

Membres de la Commission du *Bulletin :* MM. BOUTY et FOUSSEREAU.

Sont élus membres du Conseil pour une période de trois années :

Membres résidants :

MM. BLONDEL, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
COLARDEAU (Emmanuel), Professeur au Collège Rollin.
FRON, Météorologiste titulaire au Bureau Central Météorologique.
HILLAIRET (André), Secrétaire général de la Société Internationale des Électriciens.

Membres non résidants :

MM. Louguinine (W.), Directeur honoraire de l'Université de Moscou (Russie).
Michelson (Albert), Professeur à l'Université de Chicago (États-Unis).
Pérot (Alfred), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Marseille.
Pionchon, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

M. Lippmann, avant de quitter le fauteuil de la Présidence, rend compte des travaux de la Société pendant l'année qui vient de s'écouler.

M. H. Le Chatelier, partant de ce fait d'observation qu'un très grand nombre d'esprits justes et rompus aux méthodes scientifiques, la majorité des chimistes français par exemple, se refusent encore à admettre la vérité des principes fondamentaux de la Thermodynamique, ou tout au moins, ce qui revient au même, la vérité de leurs conséquences directes, conclut que ces principes ne sont pas, dans l'enseignement de la Thermodynamique classique, établis sur des bases assez évidentes. Il montre ensuite, par un exemple emprunté aux travaux de J. Williard Gibbs, que les formules applicables aux phénomènes chimiques, auxquelles conduisent les méthodes de Clausius, sont par leurs complications impropres à tout usage. Une réforme dans les méthodes de la Thermodynamique s'impose donc : il faut l'appuyer sur des bases plus facilement accessibles et il faut la débarrasser d'un appareil mathématique inutile qui masque les faits d'observation directs seuls intéressants.

Les fondateurs de la Thermodynamique : Clausius, Thomson et Rankine ont fait ouvertement reposer cette science sur une hypothèse relative à la nature de la chaleur. Aujourd'hui on est d'accord pour reconnaître que la Thermodynamique est indépendante de l'hypothèse qui lui a servi de point de départ et pour déclarer que l'intérêt de cette hypothèse est purement historique; mais on a négligé, en supprimant cette hypothèse, de la remplacer par une base expérimentale suffisamment ferme. Le principe d'équivalence, qui était une conséquence immédiate de l'hypothèse relative à la chaleur, est aujourd'hui établi par une induction peu satisfaisante. Cette induction, dans certains cas, établit des rapprochements entre des phénomènes sans aucune analogie, dans d'autres cas elle s'appuie sur des expériences extrêmement délicates dont on ne peut apprécier la portée sans être à la fois un physicien et un mathématicien consommé.

En réalité cependant il est possible d'édifier la Thermodynamique en l'appuyant sur des faits d'observation très simples, de façon à conserver à cette science le caractère d'évidence intuitive que Carnot lui avait donné et que Clausius lui a enlevé. Il est indispensable pour cela de grouper tout l'exposé de cette science autour de la notion de *puissance motrice*, comme l'avait fait Carnot.

La *puissance motrice* est cette propriété qu'ont certaines transformations spontanées des corps (chute de chaleur d'un corps chaud à un corps froid, déplacement de deux corps qui s'attirent, réactions chimiques, etc.) de pouvoir provoquer certains changements analogues dans des systèmes de corps étrangers avec lesquels ils sont mis en relation. Cette notion est accessible à tout esprit observateur, même dépourvu d'éducation scientifique; elle donne une signification tangible à toutes les formules de la Thermodynamique qui ne font la plupart qu'exprimer cette mesure de la puissance motrice. Enfin elle permet une définition plus claire de la *réversibilité* et de l'*équilibre* qui sont l'un et l'autre caractérisés par la possibilité de renverser le sens de la transformation considérée avec une dépense infiniment petite de puissance motrice.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES

SUR L'EXERCICE 1892-1893.

Messieurs,

La Commission que vous avez nommée dans votre précédente réunion a l'honneur de vous rendre compte de l'exécution de son mandat.

D'après les documents présentés par M. le Trésorier, les recettes et les dépenses de l'exercice 1892-1893 ont été les suivantes :

Recettes.

En caisse au 1er décembre 1892		5768,79 fr
Cotisations arriérées	310,00 fr	
» 1893	7440,60	
» 1894	40,00	7790,60
Droits d'entrée		110,00
Souscriptions perpétuelles		2650,10
Intérêts du capital		1729,34
Vente des publications de la Société		202,10
Subvention ministérielle		240,00
Total des recettes		18490,93

Dépenses.

	fr
Loyer du siège social	600,00
Supplément pour séances extraordinaires et emploi des machines	438,60
Traitement de l'agent	2000,00
Abonnements et reliures	341,10
Achats de livres	477,75
Indemnité pour le service de la Bibliothèque	300,00
Bibliothèque circulante	67,15
Frais de bureau ; étrennes	477,20
Recouvrement des cotisations	178,81
Frais d'expériences	92,25
Séance de Pâques	444,15
Gravure du *Bulletin*	92,50
Distribution du *Bulletin*	462,95
Divers (appareil Molteni, outils, etc.)	958,00
Versé à MM. Gauthier-Villars et fils	4417,47
Achat de 6 obligations Est (nominatives)	2747,90
TOTAL DES DÉPENSES	14095,83
D'où résulte un excédent de recettes, en caisse au 1er décembre 1893	4395,10
TOTAL ÉGAL A CELUI DES RECETTES	18490,93

Détail des comptes relatifs aux publications.

	fr
Bulletin des séances, 3e fascicule 1891 (juillet à décembre), à 830 exemplaires	1159,65
Bulletin des séances, 1er fascicule 1892 (janvier-avril), à 900 exemplaires	1675,25
Circulaires et impressions diverses	228,70
Ordre du jour des séances, novembre 1892 à juillet 1892	1315,77
Expédition de volumes et fournitures de librairie	38,10
TOTAL VERSÉ A MM. GAUTHIER-VILLARS ET FILS	4417,47

La situation de la Société au 30 novembre 1893 peut se résumer comme suit :

Actif.

	fr
69 obligations du chemin de fer du Midi (anciennes) nominatives, achetées 24940fr,05, valant	32223,00
obligations du chemin de fer du Midi (anciennes) au porteur, achetées 1182fr,32, valant	1401,00

19 obligations du chemin de fer du Midi (nouvelles) au porteur, achetées 7692^{fr},25, valant	8811,25
6 obligations du chemin de fer de l'Est (anciennes) nominatives, achetées 2653^{fr},50, valant	2778,00
10 obligations du chemin de fer de l'Est (nouvelles) au porteur, achetées 3997^{fr},50, valant	4577,50
10 obligations du chemin de fer de l'Est (nouvelles) nominatives, achetées 4460^{fr}, valant	4577,50
6 obligations du chemin de fer de l'Est nominatives, achetées 2728^{fr},50, valant	2746,50
123 obligations achetées 47654,12, valant au 30 novembre 1893	57114,75
En caisse au 30 novembre 1893	4395,10
TOTAL DE L'ACTIF IMMÉDIATEMENT RÉALISABLE	61509,85

Passif.

Mémoires dus à MM. Gauthier-Villars et fils :

Bulletin des séances, 2e fascicule 1892 (avril à novembre), à 900 exemplaires	fr 992,40
Bulletin des séances, 3e fascicule 1892 (novembre à décembre), à 900 exemplaires	1381,35
Bulletin des séances, 1er fascicule 1893 (janvier à avril), 900 exemplaires	983,00
Circulaires et impressions diverses	263,70
Ordre du jour des séances (novembre 1892 à juillet 1893)	1608,27
Expédition de volumes et fournitures diverses	76,00
TOTAL	5304,72
D'où ressort un excédent d'actif de	56205,13
TOTAL ÉGAL A L'ACTIF	61509,85
Si à l'excédent ci-dessus	56205,13

On ajoute la valeur de l'actif non immédiatement réalisable, savoir :

Volumes en dépôt chez MM. Gauthier-Villars et fils :

Coulomb	657 Volumes		
Ampère I	715 »		
Ampère II	823 »	3995 volumes à 6^{fr} l'un	fr 23970,00
Pendule I	849 »		
Pendule II	951 »		
Cotisations à recouvrer, évaluées			500,00
On obtient pour l'*avoir total de la Société*			80675,13

Statistique.

Au 1er décembre 1892	758	Membres.
Reçus en 1893	37	»
TOTAL	795	Membres.

D'où il faut retrancher :

Décédés	6	18
Démissionnaires ou rayés	12	
Il reste donc au 1er décembre 1893		777

Savoir :

391 à Paris,
241 en province,
145 à l'étranger,

Les Membres perpétuels sont au nombre de 211, savoir :

178 (dont 23 décédés) ayant versé...		200fr,	soit	35600fr,00
20	»	150,	»	3000,00
8	»	100,	»	800,00
5	»	50,	»	250,00
211	TOTAL DES VERSEMENTS			39650,00

Enfin, dans l'actif de la Société, deux sommes proviennent de dons et ont des affectations spéciales; savoir :

Fonds Guébhard pour la Bibliothèque	9500,00
Dons pour le Volume des Constantes	5000,00
TOTAL	14500,00

La Commission a constaté le soin et le dévouement que M. le TRÉSORIER apporte dans l'accomplissement de sa tâche; elle vous propose de lui adresser des remercîments et d'approuver les Comptes tels qu'ils viennent de vous être présentés.

Paris, le 24 décembre 1893.

Les membres de la Commission,

POIRÉ, POLLARD et LUCIEN BORDET, Rapporteur.

ALLOCUTION

PRONONCÉE DANS LA SÉANCE DU 5 JANVIER 1894

Par M. LIPPMANN,

Président sortant de la Société française de Physique.

Mes chers Confrères,

Avant d'inviter M. Joubert à venir prendre sa place au fauteuil, j'ai à cœur de vous remercier de nouveau du très grand honneur que vous m'avez fait en me confiant la Présidence de la Société française de Physique. En m'accordant vos bienveillants suffrages, vous vous êtes rappelé que j'étais un des membres les plus anciens et les plus dévoués de notre Société.

Pendant l'année qui vient de s'écouler nous avons eu la douleur de perdre six de nos confrères : MM. Buchin, Ingénieur à Bordeaux; Civiale, Capitaine du génie démissionnaire, à Paris; Fridblatt, Directeur des postes et télégraphes, à Chaumont; Ledolley, Inspecteur des postes, à Lyon; Létang, ancien préparateur à la Sorbonne; Vion, Conservateur de la bibliothèque d'Amiens. Au nom de la Société de Physique, j'adresse un dernier hommage à ces confrères qui nous ont été si cruellement enlevés, et dont nous gardons affectueusement le souvenir.

La Société de Physique a atteint l'âge de 21 ans. La situation morale et matérielle est des plus prospères. Le nombre de ses membres est monté de 758 à 777, déduction faite des pertes qu'elle a faites par décès, démissions ou radiations. Elle a reçu 37 membres nouveaux (18 de Paris, 13 de province, 6 de l'étranger).

Les Communications que nous avons entendues ont présenté le même intérêt que les années précédentes, et nos séances ont toujours été également suivies. Il suffit de rappeler, parmi les plus remarquables, les brillantes conférences de M. Violle sur la température de l'arc électrique, et de M. Moissan sur la production du diamant; et à cette occasion nous adressons nos remercîments à M. le Colonel Laussedat pour l'hospitalité qu'il nous a offerte aux Arts et Métiers. On se souvient également des communications de M. Cornu sur les réseaux, de M. Mascart sur les franges d'interférences achromatiques, de M. le Commandant Defforges sur le pendule, de M. Guillaume sur diverses mesures de précision, de M. d'Arsonval sur les effets physiologiques des courants de haute fréquence, de M. Michelson sur les interférences à très grande différence de marche, de M. Bouty sur la capacité électrique, de M. Amagat sur la compressibilité et de beaucoup d'autres qu'il serait trop long de nommer.

Notre séance de Pâques a été brillante, comme les années précédentes. Trois de nos confrères de province y ont contribué par leurs Communications : M. P. Janet sur les oscillations électriques; M. Macé de Lépinay sur les étalons de lumière, M. Peyrusson sur un nouvel accumulateur. Plusieurs constructeurs ont bien voulu y installer et y démontrer d'intéressants instruments; nous leur en adressons de nouveau tous nos remercîments.

Notre bibliothèque s'est accrue cette année non seulement par l'achat de plusieurs ouvrages importants, mais par des échanges et des dons. Grâce à M. le Commandant Defforges, qui a pensé à nous en Amérique avec un zèle intelligent dont nous lui sommes très reconnaissants, notre Société possède dix nouveaux périodiques importants :

1° L'observatoire de Greenwich, dont nous avons reçu la collection de 1844 à 1890.

2° *Publication of the Lick Observatory.*

3° *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.*

4° *Astronomy and astro-physics* (Charleton college Northfield, Minn. U. S. A.).

5° *The physical Review,* publié par M. Nichols.

6° *Technology quarterly and Proceedings of the Society of Arts* (Boston).

7° *The coast and geodetic Survey* (Washington).

8° *The American Journal of Science,* publié par D. et E. S. Dana.

9° *The Journal of the Franklin Institute* (Philadelphia).

10° *Proceedings of the American Philosophical Society* (Philadelphia).

Votre bureau a adressé ses remercîments aux auteurs et éditeurs de ces périodiques, aux donateurs de divers ouvrages, ainsi qu'à un généreux anonyme qui a offert à notre bibliothèque une série d'ouvrages anciens et modernes, dont la liste sera ajoutée au Catalogue. Ce Catalogue, déjà considérable, a été imprimé à titre gracieux par MM. Gauthier-Villars auxquels nous adressons de nouveau l'expression de notre gratitude.

En terminant, Messieurs, je suis heureux de convier M. Joubert, notre ancien et dévoué Secrétaire général, à venir prendre la présidence pour l'année 1894.

Les principes fondamentaux de l'énergétique et leur application aux phénomènes chimiques;

Par M. Henry Le Chatelier.

Le développement de la Thermodynamique, au moins à ses débuts, s'est effectué en partant de deux points de vue essentiellement différents, qui font encore l'un et l'autre sentir leur influence contradictoire dans l'enseignement de cette science.

Sadi Carnot, Mayer, Helmholtz ont pris comme point de départ la généralisation du principe de l'impossibilité du mouvement perpétuel. Ils ont admis que, chaque fois que du travail était produit, il fallait que quelque autre chose fut définitivement consommé, et en cherchant ce qui pouvait bien être ainsi consommé dans la production du travail aux dépens de la chaleur, ils ont trouvé : Sadi Carnot une consommation de différence de température, c'est-à-dire un rétablissement d'équilibre calorifique et Mayer une consommation de quantité de chaleur.

Mais ce point de vue essentiellement philosophique fut bientôt abandonné, et Thomson, Clausius, Rankine, les véritables fondateurs de la Thermodynamique moderne, prirent comme point de départ une hypothèse relative à la nature de la chaleur. Cette méthode d'exposition a été à son tour, il est vrai, abandonnée au moins en principe; on proclame aujourd'hui que la Thermodynamique est fondée sur un certain nombre de lois expérimentales indépendantes de toute hypothèse, mais en pratique on n'est pas arrivé à se débarrasser de l'hypothèse initiale qui reste toujours sous-entendue et reparaît même parfois ouvertement, par exemple avec la notion d'*énergie*.

Cette notion d'énergie, autour de laquelle gravitent aujourd'hui tous les développements de la Thermodynamique, est, en raison de son défaut d'objectivité, une cause de grande obscurité quand on veut l'envisager indépendamment des hypothèses qu'elle était destinée primitivement à exprimer. L'objet de la tentative faite ici est de faire disparaître de la Thermodynamique les derniers vestiges de ces hypothèses. Pour cela, je ferai complètement abstraction de la notion d'énergie et ferai reparaître systématiquement en son lieu et place la notion d'une réalité bien plus concrète de *puissance motrice* vers laquelle Sadi Carnot avait tout d'abord fait converger la nouvelle science de la chaleur.

Enfin, j'insisterai, plus qu'on ne le fait habituellement, sur les analogies de tous les phénomènes naturels (calorifiques, électriques, chimiques, mécaniques). Cela est indispensable pour la claire compréhension des phénomènes chimiques, qui sont plus spécialement visés dans cette étude; cela est aussi plus conforme à la réalité des faits dans lesquels la chaleur et le travail ne s'isolent pas des autres phénomènes similaires, comme le laisserait supposer l'exposé classique de la Thermodynamique. C'est pour accuser ce point de vue que l'expression d'*Énergétique* proposée par Rankine a été substituée à celle de *Thermodynamique* plus usuelle aujourd'hui, au moins en France.

I.

LOIS DE L'ÉNERGÉTIQUE.

De la puissance motrice et de ses échanges. — Un examen même très superficiel de la plupart de nos opérations industrielles (production du travail, de l'électricité, etc., par les chutes d'eau, par les machines à vapeur, par les moteurs à gaz, par les piles, etc.), montre que ces opérations peuvent se décomposer en deux parties bien distinctes et même opposées : développement d'un premier phénomène qui pourrait se produire spontanément et indépendamment du second (descente de l'eau, chute de chaleur du foyer au condenseur, combustion des gaz, dissolution du zinc dans l'acide) et d'un second phénomène (élévation d'un poids, compression d'un gaz, charge d'un accumulateur) qui présente le double caractère suivant : d'abord de ne pouvoir se produire indépendamment du premier phénomène, et, en outre, de pouvoir, une fois produit, changer spontanément de sens, se produire en sens inverse de façon à jouer alors le même rôle que le premier phénomène envisagé. Dans toutes les opérations semblables, il y a échange entre deux systèmes de corps en présence d'une certaine propriété qui est perdue par l'un des systèmes et gagnée par l'autre : *celle de pouvoir se transformer directement, soit isolément, soit en provoquant dans un autre système une transformation inverse. Cette propriété sera appelée puissance motrice* (¹); sa notion comprend à la fois une idée de causalité et une idée de réciprocité.

Les exemples cités ici font déjà entrevoir que la puissance motrice n'est pas seulement une qualité vague et indéterminée,

---

(¹) Il peut être utile de rappeler la synonymie très nombreuse de cette expression. Il y a identité absolue de signification dans les termes suivants : Puissance motrice (Sadi Carnot); Force (S. Robert); Power of working (Tait); Motivity (Thomson); Available energy (Maxwell); Kraft (Mayer); Freie energie (Helmholtz). Les formules algébriques suivantes : Fonctions caractéristiques (Massieu); Potentiel thermodynamique (Gibbs, Duhem, Natanson, etc.) en expriment la mesure. Enfin, souvent l'expression d'Énergie et parfois aussi celle de Travail sont employées à tort dans le même sens.

mais bien une grandeur mesurable. On le démontrera plus loin d'une façon rigoureuse.

Des diverses espèces de puissance motrice. — Une revue rapide de quelques-uns des changements des corps susceptibles de développer de la puissance motrice achèvera de préciser la notion de puissance motrice et montrera les différents aspects sous lesquels elle se manifeste.

Travail. — Chutes d'eau, accumulateurs hydrauliques, travail musculaire, détente des gaz, etc.

Force vive. — Vitesse du vent ou des cours d'eau, choc des projectiles, régulateurs à force centrifuge, etc.

Chaleur. — Machines à vapeur, piles thermoélectriques, etc.

Électricité. — Électrolyse, transport électrique de la force, etc.

Réactions chimiques. — Moteur à gaz tonnant, piles, explosifs, etc.

De la destruction de la force motrice. — Les transformations spontanées d'un système, lorsqu'elles se produisent isolément sans provoquer dans un autre système une transformation inverse, amènent une destruction de force motrice, puisque le système considéré perd la sienne sans qu'aucun autre en gagne simultanément. Ces destructions de puissance motrice très nuisibles dans toutes les opérations industrielles ont été depuis longtemps étudiées; elles se rattachent aux phénomènes suivants, réunis sous la dénomination générale de *résistances passives*.

Frottement pour le travail et la force vive.

Chute de chaleur par conductibilité ou rayonnement.

Résistance des conducteurs dans la propagation de l'électricité.

De l'équilibre et de la réversibilité. — Entre les transformations spontanées directes qui développent de la puissance motrice et les transformations inverses qui en absorbent, on conçoit sans peine l'existence d'une catégorie de transformations qui ne se produisent pas spontanément et, par suite, ne fournissent

pas de puissance motrice, mais dont la production dans l'un ou l'autre sens n'exige qu'une dépense infiniment petite de puissance motrice. Tel sera le cas d'un système composé de deux corps identiques suspendus aux extrémités des bras d'une balance, qui ne se déplacera pas de lui-même, mais pourra être déplacé dans un sens ou dans l'autre avec une dépense très petite de puissance motrice; il suffit d'une surcharge de l'un des corps, égale seulement au millionième de son poids, pour faire pencher la balance. En fait, les résistances passives de nos machines ne nous permettent jamais de réaliser aucune transformation avec une consommation rigoureusement nulle de puissance motrice, mais en les perfectionnant de plus en plus, nous pouvons de plus en plus approcher d'un semblable résultat, assez, en tous cas, pour concevoir facilement des machines idéales rigoureusement parfaites à l'aide desquelles certains systèmes pourraient être transformés dans un sens ou dans le sens opposé sans dépense de puissance motrice. Toute transformation semblable est dite *réversible;* l'état d'un système qui ne peut pas se transformer spontanément, mais peut être transformé d'une façon réversible est dit un état *d'équilibre*. On voit, d'après cette définition, qu'il est impossible de parler d'état d'équilibre sans spécifier la transformation que l'on vise; deux corps de même poids suspendus aux deux extrémités d'une balance seront en équilibre mécanique; ils pourront ne pas être en équilibre calorifique ou électrique, c'est-à-dire ne pas avoir la même température ou la même tension électrique.

Des machines et de l'isolement des systèmes matériels. — Dans les exemples rappelés précédemment du travail fourni par les machines à vapeur, les chutes d'eau, etc., on n'a envisagé que les corps qui éprouvent un changement définitif : l'eau qui est tombée, la chaleur qui est passée du foyer au condensateur, l'accumulateur qui s'est chargé; on a fait abstraction des corps intermédiaires, des machines dont l'intervention est cependant absolument nécessaire pour mettre en relation les systèmes qui échangent leur puissance motrice (la roue hydraulique, la chaudière et le cylindre à vapeur, la dynamo, etc.). Le caractère essentiel des machines est de revenir, après avoir coopéré à certaines transformations, à un état final identique à leur état

initial, de telle sorte qu'elles peuvent recommencer le même cycle d'opérations et servir ainsi à des échanges indéfinis de puissance motrice. Les corps, machines véritables ou autres, qui reviennent ainsi à un état final identique à leur état initial, c'est-à-dire qui décrivent ce que l'on appelle un cycle fermé de transformations, jouent un rôle capital dans les raisonnements de la Thermodynamique, c'est Sadi Carnot qui a le premier signalé l'importance de leur intervention.

Les machines ne servent pas seulement à transporter la puissance motrice d'un corps à un autre, elles ont encore pour objet de la transformer d'une espèce dans une autre (puissance calorifique en puissance mécanique dans la machine à vapeur, etc.). Les phénomènes élémentaires qui concourent à ces transformations sont, malgré la multiplicité apparente de nos machines industrielles, extrêmement peu nombreux.

La transformation réciproque de la *chaleur* en *travail* s'obtient par les phénomènes élastiques (changement de volume des corps), de la *chaleur* en *électricité* par les phénomènes thermoélectriques, de l'*électricité* en *travail* par les phénomènes électromagnétiques (déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique); la transformation réciproque du travail en force vive et celle de la puissance chimique en travail, chaleur, électricité se fait dans l'intérieur même des systèmes matériels qui se transforment sans l'intervention d'aucune machine extérieure.

Au mode d'intervention des machines se rattache une notion d'une importance capitale, celle de l'*isolement* des systèmes matériels. Dans le cas de la machine à vapeur qui transforme de la puissance calorifique en travail, qui élève de l'eau avec une pompe par exemple, les phénomènes calorifiques se produisent entre le foyer, le condenseur et la vapeur : il n'y a aucun échange de chaleur avec l'eau élevée par la pompe. On dira que le système complexe foyer, condenseur, vapeur, est isolé thermiquement parce qu'il ne cède de chaleur à aucun corps extérieur (en faisant abstraction des pertes de chaleur par rayonnement qui sont censées ne pas exister dans la machine idéale que l'on considère). De même, le système complexe eau, terre, vapeur avec les pompes, cylindres et organes de transmission constitue un système isolé mécaniquement. Mais en tenant compte de ce que la machine revient

finalement à son état initial et par suite n'a rien gardé de la puissance motrice qu'elle a reçue transitoirement, on pourra étendre cette définition de l'isolement en faisant abstraction des machines; on considérera le foyer et le condenseur comme isolés calorifiquement, l'eau et la terre comme isolées mécaniquement, bien qu'ils aient échangé, les uns de la chaleur, les autres du travail avec la machine intermédiaire.

On appellera donc *partiellement isolé* au point de vue d'une puissance motrice d'une nature déterminée tout système qui n'aura pas échangé avec l'extérieur de la puissance motrice considérée ou ne l'aura fait qu'avec des corps revenus finalement à leur état initial, sans que ceux-ci aient fait non plus pendant la suite de leurs transformations d'échange semblable avec aucun autre corps extérieur.

On appellera *totalement isolé* tout système qui n'aura échangé avec l'extérieur *aucune espèce* de puissance motrice ou ne l'aura fait qu'avec des machines qui n'auront à aucun moment fait de semblables échanges avec l'extérieur.

Ces notions générales et les définitions qui s'y rattachent étaient indispensables à rappeler parce qu'il en sera fait un usage fréquent dans l'exposé des lois fondamentales de l'énergétique, c'est-à-dire des lois qui président aux transformations de la puissance motrice.

On peut, dans l'étude de ces lois, se placer à deux points de vue différents : s'attacher de préférence à suivre les transformations des systèmes matériels qui fonctionnent comme machines, c'est-à-dire servent aux transformations de la puissance motrice, mais ne la créent ni ne la consomment : c'est la marche aujourd'hui la plus usitée en Thermodynamique; on peut au contraire faire abstraction des machines et ne se préoccuper que des systèmes matériels qui dépensent et consomment la puissance motrice. C'est la marche qui sera suivie ici parce qu'elle conduit plus directement aux applications pratiques, ou tout au moins à celles de ces applications qui concernent les phénomènes chimiques.

Nous distinguerons trois lois fondamentales de l'Énergétique qui présentent ce caractère commun d'être d'ordre purement expérimental, mais en même temps d'être d'une observation assez simple pour pouvoir être reconnues indépendamment de toute

expérimentation scientifique. Cette dernière n'intervient que pour fixer certaines relations numériques qui précisent la portée des lois fondamentales.

Ces lois sont les suivantes :

Première loi. — *Conservation de la capacité de puissance motrice.*

Deuxième loi. — *Conservation de la puissance motrice.*

Troisième loi. — *Conservation de l'énergie.*

PREMIÈRE LOI.

CONSERVATION DE LA CAPACITÉ DE PUISSANCE MOTRICE.

Cette loi est le résumé d'une série de lois partielles connues depuis longtemps, mais dont les analogies avaient été jusqu'ici méconnues. On peut en donner l'énoncé général suivant :

Principe expérimental. — *Un système matériel partiellement isolé ne peut dépenser à l'extérieur de la puissance motrice sans que deux au moins de ses parties arrivent à un état final différent de leur état initial après avoir éprouvé des changements de même espèce.*

Dans cet énoncé l'isolement partiel s'applique à la puissance motrice qui s'est modifiée définitivement dans le système considéré.

Voici quelques-uns des faits expérimentaux que résume cette loi :

Puissance calorifique. — Échange de chaleur entre le foyer et le condenseur dans la machine à vapeur, entre les deux soudures dans la pile thermoélectrique. Il faut toujours l'intervention de deux sources de chaleur au moins dont l'une perd de la chaleur et l'autre en gagne.

Puissance électrique. — Variations corrélatives des électricités dites négatives et positives. Il y a toujours au moins deux corps dont l'état électrique se modifie simultanément.

Force vive, travail. — Déplacement simultané des différents

corps qui s'attirent, changement simultané de vitesse des corps qui se choquent.

Cette loi générale conduit, comme M. G. Mouret [1] l'a fait voir dans le cas particulier de la chaleur, à une conséquence très importante qui peut être généralisée à toutes les puissances motrices et qui est la suivante :

Dans tout échange de puissance motrice effectuée par voie réversible, il existe entre la grandeur des changements corrélatifs de même nature une relation nécessaire indépendante des états intermédiaires de la transformation et des machines mises en œuvre. Il est toujours sous-entendu qu'il s'agit d'un système partiellement isolé, c'est-à-dire que le système considéré comprend tous les corps sans aucune exception qui éprouvent des changements corrélatifs de même espèce.

On le démontre en employant le raisonnement bien connu de Sadi Carnot qui consiste à faire deux opérations inverses de manière à ramener l'un des corps à son état initial; le second doit aussi y revenir, sans quoi on aurait réussi à modifier un seul des corps en présence, ce qui est contraire au principe général admis comme point de départ.

On peut encore énoncer cette loi en disant que *dans toute dépense de puissance motrice par voie réversible il y a une fonction des changements corrélatifs de même nature qui reste constante.* Il faut demander à l'expérimentation scientifique la détermination de cette fonction dont la connaissance achèvera de préciser le sens de la loi générale qui avait pu être déduite de la simple observation des faits. On obtient ainsi les relations suivantes bien connues :

Travail (Newton). — Conservation du centre de gravité

$$m\,dl + m'\,dl' + \ldots = 0.$$

Force vive (Descartes). — Conservation de la quantité de mouvement

$$m\,du + m'\,du' + \ldots = 0.$$

---

(1) G. MOURET, *Sadi Carnot et la Science de l'énergie* (*Revue générale des Sciences*; 1892).

Élasticité. — Conservation du volume

$$dv + dv' + \ldots = 0.$$

Électricité (Faraday). — Conservation de la quantité d'électricité

$$di + di' + \ldots = 0.$$

Toutes ces relations dont l'existence a été démontrée *a priori* nécessaire dans le cas des transformations réversibles se trouvent encore être exactes dans le cas des transformations irréversibles. Il n'en est plus de même pour la chaleur qui constitue ainsi une exception parmi les diverses espèces de puissance motrice.

Chaleur (Clausius). — Conservation de l'entropie,

$$\frac{dq}{t} + \frac{dq'}{t'} + \ldots = 0.$$

On vient d'établir que dans tout échange réversible de chaleur entre deux sources à des températures différentes, à toute quantité de chaleur échangée par une des sources correspond une quantité de chaleur échangée par l'autre source déterminée entièrement, c'est-à-dire ne dépendant que de la température des sources et de la quantité de chaleur échangée par la première source, mais indépendante des intermédiaires mis en œuvre dans la transmission de chaleur. D'autre part, d'après le mode de fonctionnement des machines, il est bien évident que les quantités de chaleur échangée par chaque source varient proportionnellement l'une à l'autre. On pourra donc convenir de prendre comme définition et mesure de la température absolue les quantités correspondantes de chaleur échangées dans une même opération réversible. Cette convention se traduit, en tenant compte de la proportionnalité qui existe entre les quantités de chaleur échangées dans différentes opérations, par l'égalité ci-dessus.

Pour établir la relation qui existe entre les températures absolues ainsi définies et les températures usuelles mesurées sur le thermomètre à air, on emploiera pour l'utilisation de la puissance motrice de deux sources une machine à gaz parfaits à laquelle on fera décrire un cycle composé de deux isothermes et de deux échauffements à volume constant, en se servant pour les calculs

des données numériques fournies par les expériences de Joule, Regnault, etc. sur les chaleurs spécifiques et chaleurs de détente des gaz parfaits. On est conduit ainsi à une relation identique à celle qui exprime la conservation de l'entropie; on en conclut que les températures thermodynamiques sont *pratiquement* identiques aux températures absolues du thermomètre.

Cette relation, démontrée dans le cas des transformations réversibles, ne se vérifie plus dans les transformations irréversibles. Ainsi, il est bien évident que dans la chute de chaleur par conductibilité d'un corps chaud à un corps froid, on a

$$\frac{dq}{t} + \frac{dq'}{t'} > 0.$$

Il y a intérêt pour la facilité du langage, de réunir sous une dénomination commune toutes ces grandeurs dont la variation individuelle est indispensable au développement de la puissance motrice, mais dont la somme totale reste invariable. On peut adopter l'expression de *capacité* (Inhalt, Capacitat), proposée par MM. Meyerhoffer et Ostwald, qui rappelle les analogies de ces grandeurs avec l'une d'entre elles, le volume qui est la capacité de puissance motrice des phénomènes élastiques.

La loi de conservation des capacités a été établie dans le cas de systèmes partiellement isolés; on peut partir de là pour une nouvelle généralisation de l'expression d'isolement partiel et l'étendre à tous changements d'un système qui s'effectuent sans variation de capacité.

DEUXIÈME LOI.

CONSERVATION DE LA PUISSANCE MOTRICE.

Le principe expérimental qui sert de base à cette loi n'est que la généralisation du principe mécanique de l'impossibilité du mouvement perpétuel. On peut, sous sa forme la plus brève, l'énoncer ainsi :

Principe expérimental. — *Il est impossible de créer de la puissance motrice.*

Cet énoncé veut dire que, toutes les fois qu'un système de corps

acquiert la propriété de se transformer spontanément et par suite de pouvoir développer de la puissance motrice, un autre système a dû perdre la même propriété. Le fonctionnement de toutes nos machines sans aucune exception vérifie ce principe; son exactitude est surtout démontrée par ce fait que les tentatives innombrables des inventeurs ayant pour objet de le mettre en défaut ont toutes échoué.

On déduit de ce principe expérimental une première conséquence relative aux phénomènes réversibles qui constitue ce que l'on doit appeler la loi de Sadi Carnot.

La puissance motrice échangée par voie réversible avec l'extérieur par un système partiellement isolé ne dépend que de l'état initial et de l'état final de ce système; elle est indépendante de ses états intermédiaires et des machines mises en œuvre.

C'est-à-dire que les changements d'un système extérieur donné corrélatifs d'un même changement du système considéré seront dans tous les cas identiques. On le démontrera dans le cas des transformations réversibles par le raisonnement bien connu de Carnot, en invoquant l'existence établie précédemment d'une relation nécessaire entre les changements corrélatifs qui se produisent (conservation de l'entropie, par exemple, dans les échanges de chaleur). Le raisonnement est indépendant, comme l'a fait remarquer M. G. Mouret, de la nature de la relation en question, il suffit seulement qu'elle existe. C'est pour cela qu'on arrive au même résultat, en partant, comme l'avait fait Sadi Carnot, de l'hypothèse inexacte de la conservation du calorique, ou en partant, comme on le fait aujourd'hui, du principe d'équivalence. On se reportera pour la démonstration complète au travail déjà cité de M. G. Mouret.

Cette loi constitue un premier acheminement vers la mesure de la puissance motrice; elle montre que c'est une grandeur dont la variation est déterminée exclusivement par les états extrêmes entre lesquels le système considéré a changé.

La loi de Carnot conduit à cette seconde conséquence : *deux changements réversibles déterminés de deux systèmes qui se sont montrés équivalents au point de vue de la production de*

la puissance motrice dans une certaine condition le seront encore dans toutes les autres. C'est-à-dire, par exemple, qu'une machine à vapeur et un accumulateur, supposés, bien entendu, sans résistances passives, qui, pour une chute donnée de chaleur et d'électricité, auront élevé un même poids à une même hauteur, produiront encore des effets identiques dans toutes les circonstances où on les utilisera parallèlement, ainsi produiront une même charge électrique d'un condensateur, décomposeront par électrolyse une même quantité d'eau. La démonstration résulte immédiatement de ce que l'effet produit par un changement donné d'un système est indépendant des états intermédiaires et des machines mises en œuvre. Pour électrolyser l'eau par exemple, on pourra commencer par transformer les deux quantités de puissance motrice disponibles en travail, dont la grandeur, d'après l'hypothèse, sera la même dans les deux cas. En appliquant ensuite ces deux quantités de travail identiques à électrolyser de l'eau par l'intermédiaire d'une dynamo, il est bien évident que le résultat sera le même dans les deux cas.

Cette loi d'*équivalence* fait faire un second pas vers la mesure de la puissance motrice ; elle montre que l'on peut définir, repérer la puissance motrice développée dans un changement donné d'un système de corps par un quelconque des effets réversibles qu'elle est susceptible de produire, par exemple en indiquant le nombre de kilogrammes qu'elle pourrait élever à 1^{m} de hauteur.

Pour arriver à la mesure définitive de la puissance motrice, il ne reste plus qu'à montrer que c'est une grandeur *additive,* c'est-à-dire que deux sources de puissance motrice identiques produiront un effet double d'une seule d'entre elles. Cela est évident d'après le fonctionnement de toutes nos machines ; on peut donc dire qu'une source de puissance motrice qui produit un effet double d'une autre, qui élève un nombre double de kilogrammes à 1^{m} de hauteur, développe une puissance motrice double. Le nombre de kilogrammètres produits mesure donc bien la grandeur de la puissance motrice développée.

La marche suivie ici est identique à celle que l'on emploie pour définir et mesurer toutes les grandeurs physiques : la force, la masse, la quantité de chaleur, la quantité d'électricité, etc.,

pour lesquelles on commence par établir la propriété d'équivalence et celle d'additivité.

Expression de la puissance motrice. — La définition et la mesure de la puissance motrice étant ainsi données, on peut chercher par voie expérimentale la relation qui existe entre la grandeur de cette puissance motrice exprimée au moyen de son unité le kilogrammètre et les grandeurs des changements du système de corps qui la développe, exprimés au moyen de leurs unités particulières. On trouve ainsi les relations suivantes à un coefficient numérique près dépendant du choix des unités :

Travail............. $fm\,dl + f'm'\,dl' + \ldots$

d'après les expériences faites sur le levier, la poulie

Force vive.......... $um\,du + u'm'\,du' + \ldots$

d'après les expériences sur la chute des corps ;

Élasticité........... $p\,dv + p'\,dv' + \ldots$

comme pour le travail mécanique ;

Électricité.......... $e\,di + e'\,di' + \ldots$

d'après les expériences sur la transformation de l'électricité en travail au moyen des dynamos et d'expériences analogues ;

Chaleur............ $dq + dq' + \ldots$

que l'on peut encore écrire, en multipliant et divisant chaque terme par t,

$$t\frac{dq}{t} + t'\frac{dq'}{t'} + \ldots,$$

d'après les expériences sur la détente isotherme des gaz parfaits qui ont déjà servi à établir le principe de conservation de l'entropie.

On remarquera que, dans tous les cas, l'expression de la variation de puissance motrice peut se mettre sous la forme d'une somme de termes se rapportant chacun à un seul des corps du système, chacun de ces termes étant un produit de deux facteurs dont l'un, d'après la définition donnée précédemment, est une

variation de *capacité* de puissance motrice et l'autre (force, vitesse, tension élastique, température, tension électrique) joue un rôle analogue à celui de la force dans le travail mécanique. On peut réunir ces grandeurs analogues sous la dénomination commune de *tension* de puissance motrice, par analogie avec l'une d'entre elles, la tension élastique.

Les expressions ci-dessus de la puissance motrice peuvent, en tenant compte de la loi de conservation des capacités de puissance motrice, être mises sous une forme plus avantageuse pour les applications numériques, que l'on obtient en faisant disparaître par une simple élimination la variation de capacité d'un des corps en présence :

Travail..............	$(f'-f)m'\,dl' + (f''-f)m''\,dl'' + \ldots$
Force vive..........	$(u'-u)m'\,du' + (u''-u)m''\,du'' + \ldots$
Élasticité............	$(p'-p)\,dv' + (p''-p)\,dv'' + \ldots$
Électricité...........	$(e'-e)\,di' + (e''-e)\,di'' + \ldots$
Chaleur.............	$(t'-t)\dfrac{dq'}{t'} + (t''-t)\dfrac{dq''}{t''}$

Ces formules ne renferment que des tensions relatives (vitesses relatives, tensions électriques relatives) qui, dans bien des cas, sont les seules que nous sachions mesurer. Les vitesses absolues, tensions électriques absolues, nous échappent jusqu'ici totalement.

Dans le cas où l'on prend les unités usuelles du kilogrammètre, de la calorie et du joule, les coefficients numériques par lesquels il faut multiplier ces expressions de la puissance motrice pour avoir leur valeur en kilogrammètres sont :

Équivalent mécanique de la chaleur..............	425
Équivalent mécanique de l'électricité.............	0,102

Quand un système éprouve des transformations simultanées de différentes natures, on démontre facilement que sa variation totale de puissance motrice est égale à la somme des variations de puissance que produirait isolément chacun des changements considérés.

Les deux dernières conséquences que l'on peut déduire du principe de l'impossibilité de créer de la puissance motrice et qui constituent à proprement parler la loi de conservation de la puissance motrice sont les suivantes :

1° *La variation de puissance motrice d'un système partiellement isolé qui revient à son état initial après une série de transformations réversibles est nulle.* — Cela résulte de ce que cette puissance motrice étant indépendante de la série des transformations par lesquelles se fait le passage de l'état initial à l'état final est le même que si le système avait tout le temps conservé son état initial sans aucun changement, conditions dans lesquelles le développement de puissance motrice serait évidemment nul.

2° *La variation de puissance motrice d'un système totalement isolé qui éprouve une transformation réversible quelconque est nulle.* — S'il n'en était pas ainsi, si la somme algébrique des variations de puissance motrice des diverses parties du système n'était pas nulle, on pourrait ramener le système considéré à son état initial en produisant au dehors de la puissance motrice, ce qui serait contraire au principe général, car on serait arrivé à accumuler de la puissance motrice dans un système extérieur sans aucune dépense corrélative.

TROISIÈME LOI.

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE.

Principe expérimental. Il est impossible de détruire de la puissance motrice sans créer de la chaleur. — C'est là un fait banal d'expérience reconnu tout d'abord par Rumford et Davy dans la destruction du travail mécanique; par Joule dans la destruction de la puissance électrique (échauffement des fils); de la force vive (échauffement des corps par le choc). Dans le cas de puissance motrice mettant en jeu des phénomènes calorifique, il faut préciser un peu plus l'énoncé de ce principe pour distinguer la part de la chaleur dont la création peut être attribuée à la destruction de la puissance motrice. On peut énoncer ainsi ce principe d'une façon rigoureuse : *il est impossible de ramener à son état initial un système de corps qui a éprouvé une transformation irréversible sans lui fournir de la puissance motrice et lui enlever de la chaleur.* C'est-à-dire qu'il ne suffit pas de lui restituer une certaine quantité de puissance motrice par l'intermédiaire d'une machine qui assure son isolement thermique, il faut encore lui enlever de la chaleur par contact avec un corps

extérieur; c'est dans ce sens que l'on peut dire dans tous les cas qu'il y a eu définitivement de la chaleur créée. Deux corps à des températures inégales mis en contact donnent lieu à une chute irréversible de chaleur qui constitue une dépense de puissance motrice; si l'on veut, en employant une machine réversible, remonter du corps froid au corps chaud, la chaleur qui est tombée en sens inverse, on n'arrivera jamais à ramener à la fois les deux corps à leur état initial : si l'un y revient, l'autre sera à une température trop élevée et il faudra le mettre en contact avec un corps extérieur pour lui enlever une certaine quantité de chaleur.

Les expériences précises de Joule ont permis de compléter ce premier énoncé purement qualitatif. Elles ont montré que : *il existe un rapport constant entre la puissance motrice détruite et la chaleur créée; de plus, ce rapport est le même que dans la transformation réversible du travail en puissance calorifique.* Cet énoncé signifie que pour ramener à son état initial un système qui a éprouvé une transformation irréversible, il faut, en employant les unités usuelles du kilogrammètre et de la calorie, lui fournir sous forme de puissance motrice de nature appropriée un nombre de kilogrammètres et lui enlever un nombre de calories qui soient entre eux dans le rapport de 425 à 1.

M. G. Mouret a montré récemment que cette équivalence entre la chaleur créée et la puissance motrice détruite pouvait être déduite d'un principe général assez plausible *a priori* qui n'est que l'extension aux phénomènes irréversibles de la loi démontrée par Carnot pour les phénomènes réversibles. Son énoncé est le même en supprimant seulement la restriction relative à la réversibilité.

La puissance motrice extérieure mise en jeu par tout changement d'un système partiellement isolé ne dépend que de l'état initial et de l'état final de ce système.

On démontre, en partant de là, que le rapport de la chaleur créée au travail détruit est le même dans les transformations réversibles et irréversibles et est le même à toute température.

Puissance motrice des corps isolés. — Toutes les lois énumérées ici s'appliquent à des systèmes complexes, les seuls qui puissent développer de la puissance motrice. Mais l'on peut, et cela

est intéressant pour certaines applications, étendre ces lois aux corps isolés. Deux méthodes permettent d'atteindre ce résultat, celle de Sadi Carnot, aujourd'hui classique, qui part de cette remarque que, dans les opérations réversibles faites à l'aide de machine, la machine et les sources de puissance motrice éprouvent à chaque instant des changements égaux et de signe contraire; de telle sorte que les relations numériques relatives aux sources et abstraction faite des machines, qui expriment les lois de conservation de la capacité des puissances motrices et de conservation de la puissance motrice sont immédiatement applicables à la machine, abstraction faite des sources.

Mais on peut suivre encore une marche plus satisfaisante à l'esprit, qui consiste à démontrer que l'expression de la variation de puissance motrice d'un ensemble de corps peut être décomposée en une série de termes se rapportant chacun à l'un des corps et ne dépendant que de l'état initial et de l'état final de chacun d'eux. De telle sorte que, dans le développement de la puissance motrice, chaque corps, pour un changement déterminé qu'il aura éprouvé, interviendra d'une quantité qui sera toujours la même, quels que soient les corps avec lesquels il soit mis en relation et les changements éprouvés par ces corps. On peut donc faire une répartition de la puissance motrice d'un système entre chacun des corps qui le compose et l'on retombe ainsi sur une expression identique à ce que l'on appelle habituellement l'énergie interne du corps.

Mais pour les applications aux phénomènes chimiques, il n'y a pas lieu de faire une semblable distinction : les systèmes complexes réels sont seuls intéressants à considérer.

Résumé. — Nous avons établi que, dans toute transformation réversible d'un système partiellement isolé, c'est-à-dire revenu finalement à un volume, une entropie, une quantité d'électricité identique à celle de son état initial, la puissance motrice échangée avec l'extérieur a pour expression

$$\omega_1 - \omega_0 = \int \sum \Big[(f' - f)_1 m' dl' + (u' - u)_1 m' du' + (p' - p)\, dv' + 0{,}102(e' - e)\, di' + 425(t' - t)\frac{dq'}{t'} \Big],$$

le signe Σ s'étendant aux différents corps du système, moins un, et le signe $\int$ aux transformations successives de l'ensemble des corps réunis sous le signe précédent.

Cette variation de puissance motrice est nulle pour les transformations réversibles suivantes :

1° Pour toute transformation réversible d'un système *totalement* isolé *sans retour* à l'état initial

$$\omega_1 - \omega_0 = 0;$$

2° Pour toute transformation réversible, d'un système *partiellement* isolé *après retour* à l'état initial.

Dans le cas de transformations irréversibles, la puissance motrice diminue, et il faut, pour ramener à son état initial le système qui a éprouvé la transformation irréversible, céder par contact à un corps extérieur une quantité de chaleur et emprunter à un second système partiellement isolé une quantité de puissances motrices qui sont équivalentes entre elles

$$\omega_1 - \omega_0 = 425\,Q.$$

II.

PHÉNOMÈNES CHIMIQUES.

Pour pouvoir étendre aux phénomènes chimiques les lois fondamentales de l'Énergétique, il faut d'abord démontrer :

1° Qu'ils peuvent développer de la puissance motrice;

2° Qu'ils peuvent, dans certaines conditions, s'effectuer par voie réversible.

Ils peuvent développer de la puissance motrice, car un grand nombre de réactions chimiques s'effectuent spontanément, et, d'autre part, toutes les réactions chimiques sont accompagnées de changements de température, pression ou force électromotrice, qui peuvent être utilisées directement comme sources de puissance motrice. C'est la combinaison du charbon avec l'oxygène qui fournit la chaleur à la machine à vapeur, la combustion du gaz qui donne la pression motrice dans le moteur à gaz, l'oxydation du zinc dans la pile qui fournit l'électricité. Enfin, les réac-

tions chimiques peuvent être réalisées en sens inverse par une dépense de puissance motrice : décomposition de l'eau par électrolyse, dissociation du carbonate de chaux par élévation de température, du bioxyde de baryum par changement de pression.

Les phénomènes chimiques peuvent s'effectuer par voie réversible; c'est la découverte capitale de Sainte-Claire Deville, qui a reconnu que toutes les réactions chimiques devenaient réversibles dans certaines conditions de pression et de température, donnaient lieu à ce qu'il a appelé des phénomènes de *dissociation*. La définition que l'on donne habituellement de la réversibilité dans les phénomènes chimiques peut sembler, à première vue, différente de celle qui a été donnée au début de cette étude; il est facile de montrer qu'au fond elles reviennent au même. On dit habituellement qu'une réaction chimique est réversible quand on peut provoquer sa réalisation dans un sens ou dans l'autre par un changement infiniment petit des conditions actuelles de pression, température et force électromotrice. Il est évident que cette modification des conditions peut être obtenue avec une dépense infiniment petite de puissance motrice. Soit en effet un système chimique à la température t_0 en présence d'un milieu indéfini à la même température; q la chaleur latente de réaction mise en jeu dans la transformation chimique du système qui se produit quand la température s'élève de t_0 à $t_0 + \Delta t$; la puissance motrice à dépenser pour provoquer la même transformation a pour expression, comme on le verra plus loin,

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{q}{\Delta t} \, \frac{t - t_0}{t} \, dt = \tfrac{1}{2} q \, \frac{\Delta t}{t_0},$$

qui est un infiniment petit par rapport à la quantité de chaleur q fournie. Les expériences de Sainte-Claire Deville prouvent donc bien que les réactions chimiques peuvent donner lieu à des phénomènes de réversibilité et d'équilibre suivant le sens donné ici à ces mots.

Il est, par suite, permis de penser que les phénomènes chimiques obéissent aux lois générales qui régissent les transformations de la puissance motrice : l'expérience l'a pleinement confirmé.

Première loi de conservation des capacités de puissance

motrice. — Cette loi, dans le cas des phénomènes chimiques, constitue la loi de *conservation de la masse* de Lavoisier. Une réaction chimique ne peut se produire et, par suite, développer de la puissance motrice sans que la masse individuelle des corps en présence varie, mais leur masse totale reste invariable. C'est donc exactement le pendant des lois relatives aux variations de volume, de quantité d'électricité, d'entropie. Cette analogie a été signalée pour la première fois par M. Meyerhoffer.

La loi de conservation de la masse joue un rôle capital en Chimie; c'est de sa découverte que date l'existence de la Chimie en tant que science. Elle a permis seule de faire des analyses chimiques complètes, en dosant par différence les corps que l'on ne peut peser directement; elle a conduit ainsi à la découverte de la loi des proportions définies et de la loi d'équivalence; elle a rendu possible la détermination précise des poids proportionnels qui sont tous obtenus à l'aide d'analyses faites par différence.

Deuxième loi de conservation de la puissance motrice. — Les raisonnements de Carnot sont applicables aux phénomènes chimiques dans tous les cas où ils peuvent s'effectuer par voie réversible. Toutes les lois déduites de l'impossibilité de créer de la puissance motrice sont immédiatement utilisables. Ces lois devraient conduire à une expression de la puissance chimique en fonction de la variation de masse et d'une force chimique de même forme que pour les autres puissances motrices :

$$X\,dm + X'\,dm' + \ldots$$

ou

$$(X' - X)\,dm' + (X'' - X)\,dm'' + \ldots.$$

Mais cela est impossible, parce que nous ne savons pas actuellement mesurer la force chimique en fonction d'un étalon de même nature; il faudrait, pour cela, en opérant comme dans le cas de la température, de la force, etc., pouvoir transformer par voie réversible un corps quelconque en un autre corps arbitrairement choisi comme étalon, c'est-à-dire savoir effectuer la transmutation des corps, ce dont nous sommes encore loin. Malgré cela, on pourra appliquer utilement la loi de conservation de la puissance motrice aux phénomènes chimiques en suivant une voie détournée et plus com-

pliquée, qui consistera à transformer au préalable la puissance chimique en puissance calorifique, électrique, mécanique, dont nous savons effectuer la mesure directe.

La méthode suivie est analogue à celle que l'on emploierait pour étudier la force vive si l'on ne savait pas mesurer la vitesse. On ramènerait au repos relatif les corps en présence en interposant entre eux des ressorts qui seraient bandés; on mesurerait le travail ainsi développé et l'on partirait de cette mesure de la puissance motrice du système en mouvement pour lui appliquer la loi de conservation.

Mais quelques-unes des applications des lois de l'Énergétique à la Chimie ne nécessitent pas cette mesure préalable de la puissance motrice; on commencera par leur exposé.

1° *Des conditions déterminantes de l'équilibre chimique.* — *Les seules conditions dont la variation puisse altérer l'état d'équilibre d'un système chimique sont celles dont la variation exige une consommation de puissance motrice.*

Pour le démontrer, supposons qu'en changeant une des conditions d'un système chimique actuellement en équilibre, cet état d'équilibre cesse d'exister. Il va se produire une réaction spontanée qui développera de la puissance motrice; ramenons la condition en question à son état initial, la réaction va se produire en sens inverse en fournissant une nouvelle quantité de puissance motrice. Il y aura donc eu création de puissance motrice sans aucune dépense corrélative, puisque l'on suppose que les changements de la condition considérée n'entraînaient aucun changement semblable. Or cela est impossible.

Toutes les conditions que l'expérience a montré influer sur l'équilibre chimique satisfont bien à la loi en question. Ces conditions sont :

L'état des corps en réaction;
La condensation individuelle de chacun d'eux;
La température;
La pression;
La force électromotrice;
L'intensité magnétique, etc.

L'*état* des corps en présence fait, par exemple, sentir son influence dans la dissociation de l'hydrate de chlore, qui ne possède pas la même tension de dissociation en présence de l'eau solide ou de la glace au-dessous de zéro. Or, il est impossible, au-dessous de zéro, de faire passer la glace à l'état d'eau liquide sans une dépense de puissance motrice, qui sera fournie sous forme de travail si l'on procède par vaporisation et condensation à température constante, ou sous forme de chaleur si l'on procède par échauffement et refroidissement à pression constante.

De même, les différents états allotropiques d'un même corps : iodure de mercure, azotate de potasse, ont, en dehors de leur point de transformation, un coefficient de solubilité différent; de même pour les différents hydrates d'un même sel : sulfate de soude, sulfate de chaux, aluminate de chaux, qui ont à une même température chacun un coefficient de solubilité différent. La sursaturation n'est que la saturation relative à un état du sel qui n'est pas le plus stable dans les conditions actuelles de température.

La *condensation* de tous les corps sans aucune exception qui interviennent dans une réaction donnée est une des conditions déterminantes de l'état d'équilibre. Si dans l'eau, au contact de cristaux d'hydrate de chlore, on vient à faire dissoudre un sel, ce qui diminue la condensation de l'eau, on modifie immédiatement l'état d'équilibre de ce composé, modification qui se manifeste par un accroissement de la tension du chlore.

Dans la décomposition des sels par l'eau, l'état d'équilibre n'est pas fonction seulement de la quantité d'acide libre renfermé dans un volume donné de la dissolution; il dépend aussi de la quantité de sel dissous : tel est le cas de la décomposition du sulfate de mercure, du chlorure d'antimoine par l'eau.

Le rôle de la température et de la pression dans les phénomènes d'équilibre chimique sont trop connus pour qu'il y ait lieu d'y insister.

Le magnétisme paraît influer sur les transformations allotropiques du fer.

Les actions de présence, au contraire, c'est-à-dire *celles des corps qui reviennent finalement à leur état initial,* n'ont aucune influence sur l'état d'équilibre. Leur seul rôle, analogue à

celui de l'huile dans les organes mécaniques des machines, est d'atténuer l'influence des résistances passives qui s'opposent au retour vers l'état d'équilibre d'un système chimique hors d'équilibre.

Telle est l'action de la mousse de platine, des ferments et microbes, de certains agents chimiques, tels que le bioxyde d'azote dans la fabrication de l'acide sulfurique, du chlorure de cuivre dans la fabrication de l'acide chlorhydrique par le procédé Deacon.

On peut affirmer en toute certitude que l'on ne trouvera jamais, ce qui a été souvent cherché, un microbe ou une cellule vivante capable de provoquer par sa seule action de présence la synthèse de l'*urée* aux dépens du carbonate d'ammoniaque et de l'eau, parce que l'on connaît déjà un ferment provoquant la réaction inverse. Trouver un semblable ferment serait la découverte du mouvement perpétuel; il suffirait, en effet, d'avoir deux systèmes semblables entre lesquels on échangerait alternativement les microbes, ce qui ne dépenserait aucun travail : on provoquerait simultanément les deux réactions inverses, l'une avec dégagement, l'autre avec absorption de chaleur. On obtiendrait donc, en partant d'un milieu à température uniforme, une source chaude et une source froide qui pourraient être ramenées à leur température initiale en produisant du travail par l'intermédiaire d'une machine, et l'on recommencerait ainsi indéfiniment.

Dans certaines opérations industrielles, fabrication de l'acide sulfurique, de l'acide chlorhydrique, il est incontestable, au point de vue pratique, que les actions de présence employées permettent d'obtenir un meilleur rendement, une réaction plus complète. Dans le procédé Deacon, on arrive, grâce à l'emploi d'un sel de cuivre, à décomposer 80 pour 100 de l'acide chlorhydrique, tandis qu'en son absence on n'en décomposerait que 40 pour 100. La raison de ce fait paradoxal à première vue est que le sel de cuivre permet d'obtenir la réaction de l'oxygène sur l'acide chlorhydrique à la température de 450°, tandis qu'en son absence la réaction ne serait possible qu'au-dessus de 800°. Or, la température est une des conditions déterminantes les plus importantes de l'état d'équilibre et la réaction considérée ici est d'autant plus complète que la température est plus basse. Ce n'est donc que d'une façon indirecte en permettant d'abaisser la température que le sel de

cuivre augmente le rendement en chlore du procédé Deacon.

2° *De l'équivalence des systèmes chimiques. — Deux systèmes en équilibre avec un troisième sont en équilibre entre eux et réciproquement.* — Cette loi, qui n'est que la généralisation de la loi du point triple de Thomson, est encore une conséquence immédiate de l'impossibilité de créer de la puissance motrice; elle résulte de ce que, comme on l'a établi plus haut, la puissance motrice développée dans une transformation réversible d'un système matériel est indépendante des états intermédiaires de la transformation. Que l'on réalise une transformation directement ou en passant par un troisième état intermédiaire, la puissance motrice sera la même. Si un troisième état est isolément en équilibre avec les deux autres, c'est-à-dire s'il peut se transformer dans les deux directions sans dépenser ni développer de puissance motrice, il en sera nécessairement de même dans la transformation directe des deux états extrêmes l'un dans l'autre.

Comme exemple des applications de cette loi, on peut signaler l'égalité des tensions de vapeur et de dissociation, des coefficients de solubilité des corps à leur point de fusion, de transformation allotropique, de déshydratation. Ainsi l'eau et la glace à 0° ont la même tension de vapeur; l'azotate d'ammoniaque à ses points de transformation dimorphique, les mêmes coefficients de solubilité; le sulfate de soude anhydre et décahydraté, le même coefficient de solubilité à 33°. L'hydrate de chlore a la même tension de dissociation au contact de l'eau et de la glace à 0°.

Expression de la puissance chimique. — Pour les autres applications de la loi de conservation de la puissance motrice aux phénomènes chimiques, il faut avoir une expression de la puissance chimique en fonction de grandeurs mesurables par l'expérience. Cette puissance motrice dépend d'ailleurs non seulement de l'état chimique final auquel le système arrive, mais aussi de l'état physique final. On considérera seulement le cas où l'état final est l'état d'équilibre chimique correspondant aux tensions initiales p_0, t_0, e_0. Soient A_0 et A_1 les deux états extrêmes de la réaction; par exemple A_0 sera, dans la dissociation de l'acide carbonique, le mélange d'oxyde de carbone et d'oxygène, A_1 l'acide

carbonique. On appellera *m* la proportion du corps A_1 formé rapportée à la quantité qui s'en formerait dans le cas où la réaction serait complète, c'est-à-dire que le maximum de *m* sera l'unité.

Pour faire le calcul de la puissance motrice, on supposera qu'il est possible de faire varier la pression, la température, la force électromotrice en laissant à volonté les réactions chimiques qui tendent à se produire s'effectuer ou non. Cela est possible dans certains cas; on admettra par induction que les résultats obtenus sont applicables à toutes les réactions chimiques.

Soit donc un système pris actuellement sous les tensions p_0, t_0, e_0 en relation avec un milieu indéfini à mêmes tensions. On fera successivement les deux opérations suivantes : on amènera le système chimique à des tensions p_1, t_1, e_1 auxquelles il serait en équilibre avec sa composition actuelle sans laisser aucune réaction chimique se produire, puis on le ramènera à ses tensions initiales en laissant les réactions chimiques se produire. La puissance motrice développée dans cette suite de transformations toutes réversibles donnera précisément la mesure cherchée de la puissance chimique. On donnera la démonstration dans le cas où une seule des tensions aura varié, la température par exemple, c'est-à-dire que l'état d'équilibre atteint correspondra à des pressions et forces électromotrices identiques à celles du système initial.

La puissance motrice échangée aura pour expression, en supposant la chaleur empruntée au milieu,

$$\int_{t_0}^{t_1} dq \frac{t - t_0}{t}.$$

Les quantités de chaleur qui doivent être fournies au système peuvent se décomposer en deux parties, les unes relatives à la portion du système qui n'éprouve pas de transformation chimique; elles se compensent exactement à l'échauffement et au refroidissement : il n'y a donc pas à en tenir compte; les autres relatives au corps en transformation chimique se composent de deux parties : la chaleur de réaction proprement dite et la chaleur d'échauffement des corps en réaction.

Appelons L la chaleur latente de réaction de la quantité totale de matière, mesurée sous tensions constantes à la température *t*;

m la quantité relative de matière transformée à une température quelconque t;

c_1, c_0 les chaleurs spécifiques des corps en réaction, qui sont liées, comme on le démontre en partant du principe de l'état initial et final donné plus loin, à la chaleur latente de réaction par la formule

$$c_1 - c_0 = \frac{dL}{dt}.$$

Nous aurons, pour un échauffement dt à partir de la température t, à dépenser une quantité de chaleur : en montant de t_0 à t_1

$$+ c_1 dt$$

en descendant de t_1 à t_0

$$- m c_0 dt - (1 - m) c_1 dt + L \frac{dm}{dt} dt,$$

soit au total

$$\left(m \frac{dL}{dt} + L \frac{dm}{dt}\right) dt = d(mL),$$

ce qui donne pour la puissance motrice chimique

$$\int_{t_0}^{t_1} d(mL) \left(\frac{t - t_0}{t}\right) = 0.$$

Dans le cas où la suite des transformations effectuées aurait été dirigée vers un état d'équilibre correspondant à des tensions p_2, t_2, c_2 différentes toutes trois des tensions initiales, un calcul identique au précédent, mais plus compliqué seulement par le fait de la présence des trois variables, conduirait à l'expression générale de la puissance chimique

$$\int_0^2 425 d(mL) \frac{t - t_0}{t} + d(mpV) \frac{p - p_0}{p} + 0{,}102 d(meI) \frac{e - e_0}{e}.$$

Dans le cas où le système chimique est très voisin de l'état d'équilibre, c'est-à-dire que $t_2 - t_0$, $p_2 - p_0$, $c_2 - c_0$ sont des infiniment petits, ce qui permet de poser

$$\frac{m - m_0}{\Delta m} = \frac{t - t_0}{\Delta t} = \frac{p - p_0}{\Delta p} = \frac{e - e_0}{\Delta e},$$

l'expression de la puissance chimique se réduit à

$$\tfrac{1}{2}\Delta m\left(425\,\mathrm{L}\,\frac{\Delta t}{t}+p\mathrm{V}\,\frac{\Delta p}{p}+0{,}102\,e\mathrm{I}\,\frac{\Delta e}{e}\right).$$

La parenthèse de cette expression n'est autre que la différentielle de la fonction caractéristique H′ de M. Massieu.

3° *Du sens du déplacement de l'équilibre chimique.* — On considère généralement comme une conséquence nécessaire de l'équilibre chimique que toute transformation produite par un changement d'une des conditions déterminantes de l'équilibre disparaît quand on ramène cette condition à sa grandeur primitive; en réalité, cette propriété n'appartient qu'à l'équilibre stable, mais nous ne connaissons en Chimie que des équilibres stables; pratiquement, cette propriété appartient à tous les faits d'équilibre susceptibles d'être étudiés expérimentalement. La condition évidente de stabilité est que le retour vers l'état initial d'un système dont l'état chimique a été seul modifié, les tensions étant les mêmes, corresponde à un dégagement d'une quantité positive de puissance motrice. On déduit de cette condition la loi suivante pour le sens du déplacement de l'équilibre chimique.

Toute variation d'une des conditions déterminantes de l'équilibre produit une transformation chimique du système qui tend à amener une variation de sens inverse de la condition considérée, c'est-à-dire que toute élévation de température d'un système actuellement en équilibre produira une réaction avec absorption de chaleur, toute élévation de pression une réaction avec diminution de volume, etc.

Il n'y a qu'à écrire que l'expression de la puissance motrice donnée plus haut est positive, soit, suivant le cas considéré,

$$\Delta m\,\frac{\mathrm{L}\Delta t}{t}>0,\qquad \Delta m\,\mathrm{V}\,\Delta p>0,\qquad \Delta m\,\mathrm{I}\,\Delta e>0.$$

Les applications expérimentales de cette loi sont nombreuses.

Influence de l'élévation de température à pression constante. Elle produit, pour tous les corps, un accroissement de fusion et de vaporisation; un accroissement de dissociation des composés exothermiques (acide carbonique, eau, iodure de mercure, carbo-

nate de chaux, bioxyde de baryum, oxyde d'argent, etc.); une diminution de dissociation des composés endothermiques qui doivent être d'autant plus stables que la température est plus élevée (oxyde de carbone, hydrogène sélénié, etc.); un accroissement de solubilité de la plupart des sels, qui se dissolvent en général, avec absorption de chaleur; une diminution de solubilité de quelques corps dont la dissolution dégage de la chaleur (hydrate de chaux, sulfate de thorium, gypse au-dessus de 35°, sulfate de soude anhydre, isobutyrate de chaux, etc.).

L'état d'équilibre des systèmes dont la transformation ne dégagerait pas de chaleur serait indépendant de la température. Cette condition est à peu près réalisée par la dissociation de l'acide iodhydrique; la solubilité du chlorure de sodium, exactement par la solubilité du gypse à 35°, etc.

Toute augmentation de pression produit une diminution de la dissociation des composés formés avec contraction : tels l'acide carbonique, tels surtout les corps solides formés aux dépens d'un gaz; dissociation du carbonate de chaux, du bioxyde de baryum; la fusion de la glace et la transformation de l'iodure d'argent hexagonal en iodure cubique peuvent être obtenues par une simple augmentation de pression. L'acétylène qui se forme sous la pression ordinaire dans les combustions incomplètes des composés organiques se transforme dans la combustion en vase clos des explosifs en carbone et formène.

4° *De l'équilibre isochimique à condensation constante.* — Pour qu'un système en équilibre sous les tensions p, t, e soit encore en équilibre sous les tensions $p + \Delta p$, $t + \Delta t$, $e + \Delta e$, il faut et il suffit que l'expression

$$425\,\mathrm{L}\,\frac{\Delta t}{t} + p\mathrm{V}\,\frac{\Delta p}{p} + 0,109\,c\mathrm{I}\,\frac{\Delta e}{e} = 0$$

soit nulle afin que la puissance motrice correspondant à un changement chimique Δm soit un infiniment petit du second ordre. Il est facile de voir qu'en supprimant le terme relatif à l'électricité on retombe sur la formule de Clapeyron pour les tensions de vapeur; en supprimant le terme relatif au volume, on retombe sur la formule de Helmholtz pour les piles. Mais l'équation obtenue

est beaucoup plus générale que les deux applications particulières rappelées ici. Elle s'applique encore au cas où un gaz inerte se trouve au contact du corps qui se vaporise ou se dissocie, et surtout au cas beaucoup plus important du système homogène en équilibre. Elle permet par exemple, connaissant le degré de dissociation de l'acide carbonique sous une pression et une température données, de calculer rigoureusement toute la série de pressions et températures correspondantes pour lesquelles le degré de dissociation sera le même, en supposant connue à toute température la valeur de la chaleur latente de réaction L.

Enfin, si la réaction chimique se fait sans changement de volume, l'état d'équilibre sera indépendant de la pression. Ce cas est sensiblement réalisé dans la dissociation de l'acide iodhydrique.

5° *De l'équilibre à tension fixe et condensation variable.* — Les lois précédentes établissent des relations absolument rigoureuses entre des grandeurs directement mesurables par l'expérience; la loi qui va être établie est encore rigoureuse, mais elle donne des relations entre des grandeurs qui ne sont pas directement mesurables par l'expérience. Elle présente néanmoins une très grande importance parce qu'il est possible de rattacher empiriquement ces grandeurs à la condensation des différents corps entrant dans le mélange et d'obtenir ainsi une relation approchée relative à ces condensations, c'est-à-dire à ce que l'on appelle l'action de masse.

Pour soumettre au calcul les mélanges de composition variable, il faut d'abord établir que l'on peut isoler par voie réversible les différents corps d'un mélange et les amener finalement à un état où la dépense totale de puissance motrice nécessitée par la séparation de chacun d'eux soit nulle ou tout au moins soit exactement connue. Cette séparation peut, au moins théoriquement, être facilement effectuée dans certains cas; on admettra par induction qu'elle est dans tous les cas possible.

Soient, par exemple, de l'acide carbonique, de l'oxyde de carbone et de l'oxygène à l'état d'équilibre chimique; nous pourrons les faire sortir en absorbant l'acide carbonique par de la chaux, l'oxyde de carbone par du nickel ou du chlorure cuivreux, l'oxy-

gène par de la baryte ou de l'iridium, et en décomposant ensuite les corps ainsi formés. Pour faire cette opération par voie réversible, on pourra, par exemple, détendre le mélange à température constante sans laisser aucune réaction se produire, de façon à l'amener à une pression pour laquelle la chaux, par exemple, sera en équilibre avec l'acide carbonique qu'il renferme; ce gaz pourra alors être absorbé par voie réversible; on isolera le carbonate de chaux fourni et on le décomposera par voie réversible en diminuant la pression. Ceci fait, on ramène le mélange à sa pression initiale et le gaz isolé à la pression que l'on désire. Il est toujours possible de choisir cette pression de façon que la somme de la puissance motrice dépensée soit nulle. Cette puissance motrice dépend évidemment de la pression du milieu dans lequel se trouvent les corps considérés; mais, dans l'application en vue ici, l'intervention du milieu s'annule finalement dans les formules. On supposera que ce milieu a une tension nulle, de façon à pouvoir dès le début en faire abstraction.

Le procédé indiqué ici pour sortir un corps d'un mélange par voie réversible n'est évidemment pas le seul que l'on puisse envisager. On peut séparer certains corps en les faisant cristalliser par refroidissement ou compression; on peut encore admettre, comme l'a fait M. Van t'Hoff, l'existence de parois semi-perméables qui ne laisseraient passer qu'un seul corps, mais ce dernier procédé a l'inconvénient de recourir à une hypothèse absolument contraire à la réalité des faits. Une membrane de caoutchouc dissout, il est vrai, en plus grande quantité l'acide carbonique que l'hydrogène et, par suite, laisse plus rapidement passer le premier gaz; mais, si l'on attend assez longtemps pour atteindre l'état d'équilibre, condition indispensable des opérations réversibles, la proportion des deux gaz qui a traversé la membrane de caoutchouc est exactement la même. Faire reposer tout le raisonnement sur une propriété qui est exactement le contre-pied de celles qui appartiennent au corps réel est évidemment peu satisfaisant. En s'appuyant sur les phénomènes de vaporisation ou de dissociation, on évite toute objection de cette nature.

Étant démontré qu'il est possible, par des artifices convenables, de faire sortir sans dépense de puissance motrice un corps quelconque d'un mélange, il est facile d'établir par une méthode due

à M. Van t'Hoff une relation entre les pressions de ces corps isolés qui doit être satisfaite pour tous les mélanges en équilibre chimique sous des tensions (pression totale, température) déterminées.

Soient deux mélanges de composition différente qui soient isolément en équilibre chimique.

Soit l'équation de la réaction chimique

$$nA = n'B + n''C,$$

où A, B, C sont les symboles représentatifs des poids moléculaires des corps en réaction ; n, n', n'' le nombre de ces poids moléculaires. Par exemple, pour la dissociation de l'acide carbonique, l'équation sera

$$1\,CO^2 = 1\,CO + 0{,}5\,O^2.$$

Pour écrire que ces systèmes sont en équilibre, il suffit d'écrire qu'une transformation chimique, à partir de leur état actuel, exige une dépense infiniment petite de puissance motrice. L'artifice employé par M. Van t'Hoff pour effectuer cette transformation chimique consiste à enlever à l'un des systèmes une certaine quantité des corps en réaction, de l'acide carbonique par exemple, et à le verser dans l'autre, et inversement, à enlever au second système une quantité équivalente des autres corps en réaction, l'oxyde de carbone et l'oxygène, pour les verser dans le premier, de telle sorte que la somme totale des éléments contenus dans chaque système est reste invariable ; le résultat est le même que s'ils avaient éprouvé chacun une transformation chimique égale et de signe contraire. Seulement, le procédé détourné suivi permet la mesure de la puissance motrice.

Si l'on appelle p_0, p'_0, p''_0 et p_1, p'_1, p''_1 les pressions des différents corps sortis des deux mélanges par voie réversible et sans dépense de puissance motrice, v, v', v'' les volumes moléculaires de ces mêmes corps isolés, mesurés chacun sous leur pression, il est facile de voir que la dépense totale de puissance motrice nécessaire, qui doit être nulle pour qu'il y ait équilibre, se réduira à

$$n\int_{p_0}^{p_1} p\,dv - n'\int_{p'_0}^{p'_1} p'\,dv' - n''\int_{p''_0}^{p''_1} p''\,dv'' = 0,$$

relation qui ne pourra être utilisée qu'après avoir établi expérimentalement la relation qui existe entre ces pressions et la composition des mélanges considérés, c'est-à-dire en s'appuyant sur des lois empiriques qui ne peuvent être qu'approchées.

On ne connaît encore cette relation d'une façon à peu près satisfaisante que dans le cas des mélanges de gaz parfaits. Si nous définissons la composition du mélange par le rapport du nombre de molécules de chaque corps au nombre total de molécules du mélange, rapport que l'on appellera la concentration ou condensation du corps considéré, on a, d'après la loi du mélange des gaz parfaits, la relation

$$\frac{p}{P} = C, \qquad \frac{p'}{P} = C', \qquad \frac{p''}{P} = C'',$$

en appelant P la pression totale du mélange.

L'équation ci-dessus peut, en tenant compte des lois de Mariotte et de Gay-Lussac, être mise sous la forme

$$Rt\left(\text{Log nép}\,\frac{p^n}{p_1'^{n'}\,p_1''^{n''}} - \text{Log nép}\,\frac{p^n}{p_0'^{n'}\,p_0''^{n''}}\right) = 0,$$

ou, en remplaçant p en valeur de C, ..., et supprimant le facteur commun Rt,

$$\text{Log nép}\,\frac{C^n}{C_1'^{n'}\,C_1''^{n''}} - \text{Log nép}\,\frac{C_0^n}{C_0'^{n'}\,C_0''^{n''}} = 0,$$

c'est-à-dire la formule bien connue

$$\frac{C^n}{C'^{n'}\,C''^{n''}} = \text{const.}$$

Si l'on combine cette relation avec celle de l'équilibre isochimique qui a été donnée plus haut, après l'avoir modifiée en tenant compte des lois de Mariotte et de Gay-Lussac, on obtient la relation générale d'équilibre chimique des systèmes gazeux

$$(n - n' - n'')\,\text{Log nép}\,P + \text{Log nép}\,\frac{C^n}{C'^{n'}\,C''^{n''}} + 500\int \frac{L\,dt}{t^2} = \text{const.},$$

équation seulement approchée parce qu'elle s'appuie sur les lois de Mariotte, de Gay-Lussac et celles du mélange des gaz, mais dont l'approximation cependant est, en raison de l'assez grande

exactitude de ces lois empiriques, infiniment supérieure à la précision que comportent les expériences sur les équilibres chimiques. Au point de vue des usages pratiques, cette relation a donc la même valeur que les relations rigoureuses établies précédemment, autant du moins que l'on ne dépasse pas les pressions d'une dizaine d'atmosphères au delà desquelles la loi de Mariotte se trouverait en défaut. On peut, par exemple, au moyen de cette formule calculer quelle sera la dissociation de l'acide carbonique pour des pressions et des températures quelconques en partant d'une seule mesure de dissociation. La courbe ci-dessous résume les résultats calculés en partant de l'expérience de Sainte-Claire Deville, sur la flamme du chalumeau à gaz tonnant CO + O qui fournit les données suivantes :

$P = 1$ atmosphère,

$t = 3000^\circ + 273$,

$$\left.\begin{array}{l} C \text{ de } CO^2 = 0,5 \\ C' \text{ de } CO = 0,33 \\ C'' \text{ de } O^2 = 0,17 \end{array}\right\} \text{coefficient de dissociation } X = \frac{C'}{C + C'} = 0,4.$$

Fig. 1.

Variation de la dissociation avec t et P

La même formule permet encore, connaissant la force électromotrice sous laquelle l'eau est dissociable à la température ordi-

naire, c'est-à-dire peut être électrolysée d'une façon réversible, de calculer la température à laquelle elle se dissociera sans l'intervention de l'électricité, etc.

On peut traiter par une méthode semblable l'influence de la condensation dans les systèmes liquides ou dissolutions. On remarquera seulement, dans ce cas, que les corps sortis du mélange peuvent être amenés sans dépense de puissance motrice à deux états différents, soit à l'état de gaz, soit à l'état de liquide. Si l'on a établi par l'expérience la relation qui existe entre la composition du mélange et la pression de la vapeur (loi des tensions de vapeur des solutions) ou la pression du liquide (loi des tensions osmotiques), on pourra, en partant de l'équation de Van t'Hoff, établir, comme on l'a fait pour les mélanges gazeux, une relation numérique entre les condensations qui correspondent à l'état d'équilibre sous les tensions fixes.

Mais ces lois des tensions de vapeur ou des tensions osmotiques sont très complexes et encore presque totalement inconnues; on admet provisoirement dans tous les calculs faits sur ce sujet des lois hypothétiques simples qui ne se vérifient approximativement que pour les solutions très diluées de quelques composés organiques, de sorte que les lois de condensation que l'on en déduit ne présentent aucune garantie d'exactitude et ne sauraient, par conséquent, être rapprochées des lois de l'Énergétique proprement dite. Elles sont néanmoins intéressantes pour l'expérimentateur parce qu'elles lui donnent une indication au moins qualitative sur la marche des phénomènes qu'il étudie.

1° *Loi hypothétique des tensions de vapeur :*

$$f = CF.$$

f tension de la vapeur émise par la dissolution du corps considéré;
F tension de vapeur saturée du même corps à l'état liquide et pur;
C condensation du même corps dans la dissolution.

2° *Loi hypothétique des tensions osmotiques,* qui est une conséquence nécessaire de la précédente,

$$\frac{P}{D} = \frac{F}{D}(1 - C).$$

P tension osmotique;
D poids spécifique de la dissolution;
D' poids spécifique de la vapeur d'eau à la même température.

On déduit de l'une ou l'autre de ces relations la loi de condensation identique à celle des mélanges gazeux

$$\frac{C^n}{C'^{n'} C''^{n''}} = \text{const.};$$

et, en tenant compte de la loi d'isodissociation, mais en négligeant le changement de volume toujours très petit dans les réactions entre corps liquides ou solides,

$$\text{Log nép} \frac{C^n}{C'^{n'} C''^{n''}} + 500 \int \frac{L\,dt}{t^2} = \text{const.},$$

qui, dans le cas d'un corps solide se dissolvant pour former une dissolution, donne la loi de solubilité, ou d'abaissement, du point de congélation

$$\text{Log nép}\, C + 500 \frac{L\,dt}{t^2} = \text{const.},$$

C étant la concentration du sel dans un cas et de l'eau dans l'autre.

Ces lois approchées pour certains composés organiques sont complètement en défaut dans le cas des solutions aqueuses; pour rétablir l'accord approché, au moins dans le cas des solutions diluées, il faut multiplier les poids moléculaires dont dépendent les valeurs de C et n par des coefficients arbitraires que l'on détermine en partant d'expériences sur un quelconque des phénomènes d'équilibre relatifs à la condensation, généralement en partant des abaissements du point de congélation. Les formules empiriques auxquelles on arrive ainsi ne se rattachent que de tellement loin aux lois de l'Énergétique qu'il n'y a pas lieu d'y insister plus longtemps ici.

Il faut seulement retenir de cette discussion ce fait que le résultat cherché peut, en théorie, être indifféremment obtenu en partant d'une loi expérimentale reliant la tension de vapeur ou la tension osmotique à la condensation. Aujourd'hui, ce sont les tensions osmotiques qui jouissent de la plus grande faveur, mais c'est là une erreur contre laquelle il est important de réagir. Le seul motif qui doive faire préférer l'une ou l'autre de ces méthodes est

le plus ou moins grand degré de précision que comportent les expériences relatives soit aux tensions de vapeur, soit aux pressions osmotiques; il est bien certain que les tensions de vapeur seules peuvent actuellement à ce point de vue donner un résultat quelconque.

La vogue dont jouissent aujourd'hui les tensions osmotiques tient à deux causes : en premier lieu, elles ont été employées par M. Van t'Hoff dans ses Mémoires classiques sur la dynamique chimique, ce qui a fait croire qu'elles étaient un intermédiaire indispensable pour établir les formules données par ce savant; en second lieu, les expériences qui les concernent sont tellement peu précises que l'on peut se contenter, pour les représenter, de lois simples dont l'inexactitude ne peut être démontrée. On n'a pas la même latitude avec les tensions de vapeur qui comportent des mesures plus précises et ont déjà été l'objet d'expériences nombreuses.

3° *Loi de conservation de l'énergie.* — Cette loi s'applique encore aux phénomènes chimiques, comme l'ont montré les expériences de Favre sur la pile. Son énoncé est le même : *Dans toutes les transformations chimiques irréversibles, la chaleur totale créée après retour à l'état initial est équivalente à la puissance motrice détruite.* Une conséquence particulière de cette loi constitue le principe fondamental de la Thermochimie dit *principe de l'état initial et final;* il s'énonce ainsi :

La quantité totale de chaleur dégagée dans une succession de réactions chimiques ne dépend que de l'état initial et final du système, pourvu que la puissance motrice développée dans les deux séries de transformations soit la même. Pour le démontrer, il suffit de ramener par la pensée le système à son état initial par une suite de transformations qui sera toujours la même et d'écrire que la somme totale des quantités de chaleur et de puissance motrice mises en jeu est nulle. Il en résulte que la quantité de chaleur dégagée est égale et de signe contraire à une somme de grandeurs dont chacune d'elles est, par hypothèse, entièrement déterminée; elle l'est donc elle-même aussi. Ce principe de l'état initial et final joue, en Thermochimie, un rôle analogue à celui de la loi de Lavoisier dans la Chimie pondérale; il

permet de calculer par différence un grand nombre de chaleurs de réactions qu'il serait impossible de mesurer directement, par exemple, la chaleur de formation de tous les composés organiques.

Dans les mesures calorimétriques usuelles, la condition relative au développement de puissance motrice externe est toujours satisfaite, parce qu'elles sont effectuées toujours à dégagement d'électricité nul, et à pression ou volume constant. A volume constant, la puissance motrice, c'est-à-dire le travail externe, est dans tous les cas nul; à pression constante, il ne dépend que de l'état initial et final du système, c'est-à-dire est dans tous cas le même.

On déduit encore de la loi de conservation de l'énergie une seconde conséquence, c'est que la somme de la quantité de chaleur L mise en jeu dans une transformation directe irréversible et de la quantité de chaleur mise en jeu dans la transformation réversible inverse est nécessairement plus grande que zéro. Dans les cas très fréquents où la seconde de ces quantités de chaleur est très petite, la chaleur directe de réaction est positive. On voit la relation qui existe entre cette conséquence de la loi de conservation de l'énergie et le principe expérimental du travail maximum en Thermochimie.

SÉANCE DU 19 JANVIER 1894.

Présidence de M. Joubert.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 5 janvier est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. Devaud, Professeur au Lycée de Besançon.
Gamet, Professeur au Lycée de Marseille.
Ozenne, Aide au Bureau international des Poids et Mesures, à Sèvres (Seine-et-Oise).

M. Cailletet, élu vice-Président; M. Lucien Poincaré, élu vice-Secrétaire; MM. Blondel, Colardeau, Fron, Hillairet, Louguinine, Michelson, Pérot et Pionchon, élus Membres du Conseil, adressent leurs remerciments à la Société.

M. le Président donne lecture d'une lettre de M. le Président de la Société internationale des Électriciens qui invite les membres de la Société de Physique à assister à une conférence faite le 24 février à 8 heures et demie du soir par M. Cornu : *Sur la Synchronisation magnétique.*

Sur la symétrie dans les phénomènes physiques. — Symétrie du champ électrique et du champ magnétique. — M. Curie pense qu'il y aurait intérêt à introduire dans l'étude des phénomènes physiques les considérations sur la symétrie familière aux cristallographes. Un corps, par exemple, peut être animé d'une certaine vitesse linéaire ou d'une vitesse de rotation, il peut être comprimé ou tordu, il peut être placé dans un champ électrique ou dans un champ magnétique, il peut être traversé par un rayon de lumière naturelle ou polarisée rectilignement ou circulairement, etc... Dans chaque cas une certaine dissymétrie caractéristique est nécessaire en chaque point du corps. — Les physiciens négligent généralement de définir la symétrie dans un phénomène parce que assez souvent les conditions de symétrie sont extrêmement simples et presque évidentes *a priori*. On faciliterait cependant l'étude de l'électricité en énonçant dès le début la symétrie caractéristique d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Au point de vue des idées générales, la notion de *symétrie caractéristique* d'un phénomène peut être rapprochée de la notion de *dimension caractéristique* de la grandeur définissant l'intensité de ce phénomène.

M. Curie donne le tableau complet de toutes les familles de groupes d'éléments de symétrie autour d'un point. On doit considérer parmi ces éléments les axes de symétrie, les centres de symétrie, les plans de symétrie, les plans de symétrie rotatoire directs ou alternes. Un groupe d'éléments de symétrie contient parfois parmi ses transformations symétriques toutes les transformations indiquées par un autre groupe plus simple; le second groupe est alors un intergroupe du premier.

Il y a intérêt à considérer au point de vue des phénomènes physiques les groupes contenant un axe d'isotropie. Ces groupes sont au nombre de cinq :

(1) $\dfrac{2L\infty,\ \infty L_2}{P\infty,\ \infty P_2}$, C
Ex. Cylindre.
Corps comprimé
dans un sens.

(2) $2L\infty,\ \infty L_2$
Cylindre tordu.

(3) $(L\infty,\ l\infty)\infty P_1$
Tronc de cône.
Champ magnétique.

(4) $\dfrac{(L\infty,\ l\infty)}{P\infty}$, C
Cylindre tournant.
Champ magnétique.

(5) $(L\infty,\ l\infty)$

$L\infty$, $l\infty$ désigne un axe d'isotropie et son inverse d'une autre espèce.

$2L\infty$ désigne un axe d'isotropie doublé.
$P\infty$ est un plan de symétrie normal à l'axe d'isotropie.
P_2, P_1 des plans de symétrie passant par l'axe d'isotropie.
$L2$ des axes binaires normaux à l'axe d'isotropie.

Les groupes (2), (3), (4) sont des intergroupes de (1).

Le groupe (5) est un intergroupe des quatre premiers.

La symétrie caractéristique d'un phénomène est seulement la symétrie maxima compatible avec l'existence du phénomène. Aussi, lorsque l'on combine deux phénomènes de symétrie donnée, ce sont les *dissymétries* qui s'ajoutent. Un phénomène est possible dans un milieu possédant la symétrie d'un des intergroupes de sa symétrie caractéristique.

M. Curie donne diverses applications de ce qui précède : un champ électrique et un champ magnétique qui se superposent avec même direction donnent un milieu possédant la dissymétrie nécessaire au phénomène de la polarisation rotatoire des corps actifs. Dans un pareil milieu on peut aussi observer des effets de torsion (expériences de Wiedemann). En tordant un fil dans un champ magnétique on peut l'aimanter, etc...; on peut encore montrer comment le phénomène de Hall est compatible avec ces notions de symétrie et se rendre compte des conditions nécessaires pour la production des phénomènes pyroélectriques et piézoélectriques. Les considérations sur la symétrie permettent de prévoir que la réalisation de certains phénomènes que l'on pourrait imaginer est impossible. Elles conduisent au contraire à rechercher d'autres phénomènes, mais sans donner de notions absolument précises sur leur nature et sans faire prévoir leur ordre de grandeur.

M. Abraham signale à nouveau une cause d'erreur dans la mesure des coefficients d'induction par les procédés qui nécessitent l'emploi d'un commutateur tournant.

Si l'induction propre L du circuit induit est un peu grande, sa constante de temps $\frac{L}{R}$ peut être comparable à la période du commutateur; alors, on ne recueille plus la totalité du courant induit, dont la durée serait supérieure à celle des contacts; et le coefficient d'induction trouvé est trop faible. On se met à l'abri de cette cause d'erreur en augmentant suffisamment la résistance de l'induit.

C'est ainsi que deux solénoïdes de même axe (résistances 109^{ohms} et 54^{ohms}) *possédant un noyau de fer doux semblaient avoir deux coefficients d'induction mutuelle nettement différents selon que l'on plaçait l'un ou l'autre d'entre eux dans le circuit induit*

$$M_{II}^{I} = 0^{\text{Henry}},543 \qquad M_{I}^{II} = 0^{\text{Henry}},568.$$

Mais, en ajoutant 200^{ohms} à l'induit, on trouve des valeurs identiques

$$M_{II}^{I} = 0,577 \qquad M_{I}^{II} = 0,576.$$

Au surplus, *si l'on admet que l'énergie fournie par les piles se retrouve tout entière sous forme d'échauffement des conducteurs ou d'énergie électrocinétique des circuits,* le principe de la conservation de l'énergie indique que le coefficient d'induction du premier circuit sur le second ne saurait être différent du coefficient d'induction du second sur le premier, en supposant encore que les coefficients soient indépendants de l'intensité des courants.

L'auteur a vérifié cette réciprocité dans un grand nombre de cas.

M. Hurmuzescu présente un certain nombre d'appareils employés dans les expériences d'électricité statique où le diélectrique est une substance particulière douée de propriétés très remarquables; l'auteur l'appelle *diélectrine.* C'est un mélange de paraffine et de soufre, qui est bien préférable à l'un ou à l'autre de ces isolants : il est plus dur, moins fusible que le premier, moins cassant et moins hygrométrique aussi que le second. Grâce à un dispositif spécial employé par M. Chabaud, on parvient à mouler ce produit; on l'obtient bien homogène, très dur, facile à travailler au tour ou à la lime; aussi peut-on lui donner diverses formes. M. Hurmuzescu montre à la Société : des bagues, des supports, une bobine, des manches de plan d'épreuve, un électrophore où le disque métallique en aluminium porté par un manche en diélectrine repose sur un gâteau en diélectrine; avec cet électrophore on obtient des étincelles de $0^{m},02$ de long; il reste chargé très longtemps et fonctionne même à l'humidité. L'auteur présente enfin des électroscopes où le support de la tige à laquelle sont attachées les feuilles d'or est un disque en diélectrine (la cage de l'électroscope est métallique pour éviter les charges par convection). La nouvelle substance, très inaltérable, comme le prouvent des échantillons parfaitement conservés depuis 1892, rendra de grands services pour les isolements surtout dans les endroits humides. A la séance de Pâques, l'auteur exposera divers appareils, en particulier deux machines électrostatiques construites par M. Chabaud.

Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique;

Par M. P. Curie.

I. Je pense qu'il y aurait intérêt à introduire dans l'étude des phénomènes physiques les considérations sur la symétrie familières aux cristallographes.

Un corps isotrope, par exemple, peut être animé d'un mouve-

ment rectiligne ou de rotation; liquide, il peut être le siège de mouvements tourbillonnaires; solide, il peut être comprimé ou tordu; il peut se trouver dans un champ électrique ou magnétique; il peut être traversé par un courant électrique ou calorifique; il peut être parcouru par un rayon de lumière naturelle ou polarisée rectilignement, circulairement, elliptiquement, etc. Dans chaque cas, une certaine dissymétrie caractéristique est nécessaire en chaque point du corps. Les dissymétries seront encore plus complexes, si l'on suppose que plusieurs de ces phénomènes coexistent dans un même milieu ou si ces phénomènes se produisent dans un milieu cristallisé qui possède déjà, de par sa constitution, une certaine dissymétrie.

Les physiciens utilisent souvent les conditions données par la symétrie, mais négligent généralement de définir la symétrie dans un phénomène, parce que, assez souvent, les conditions de symétrie sont simples et presque évidentes *a priori* (¹).

Dans l'enseignement de la Physique, il vaudrait cependant mieux exposer franchement ces questions : dans l'étude de l'électricité, par exemple, énoncer presque au début la symétrie caractéristique du champ électrique et du champ magnétique; on pourrait ensuite se servir de ces notions pour simplifier bien des démonstrations.

Au point de vue des idées générales, la notion de symétrie peut être rapprochée de la notion de *dimension :* ces deux notions fondamentales sont respectivement caractéristiques pour le *milieu* où se passe un phénomène et pour la *grandeur* qui sert à en évaluer l'intensité.

Deux milieux de même dyssimétrie ont entre eux un lieu particulier, dont on peut tirer des conséquences physiques. Une liaison du même genre existe entre deux grandeurs de même dimension. Enfin, lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. De même, dans la mise en équation d'un phéno-

---

(¹) Les cristallographes qui ont à considérer des cas plus complexes ont établi la théorie générale de la symétrie. Dans les traités de Cristallographie physique (qui sont en même temps de véritables traités de Physique), les questions de symétrie sont exposées avec le plus grand soin. *Voir* les traités de Mallard, de Liebisch, de Soret.

mène physique, il y a une liaison de cause à effet entre les grandeurs qui figurent dans les deux membres et ces deux membres ont même dimension.

II. Opérations de recouvrement et éléments de symétrie. — L'établissement des divers types de symétrie peut être divisé en deux grands Chapitres, suivant qu'il s'agit de définir la symétrie d'un système limité ou d'un système qui peut être regardé comme étant illimité. Nous ne nous occcuperons ici que d'un système limité ([1]).

Considérons un système défini à l'aide de données analytiques et de trois axes coordonnés rectangulaires, par exemple. Le système possédera une certaine symétrie si, en se servant d'autres axes coordonnés rectangulaires, il se trouve encore défini avec les mêmes données analytiques.

Les éléments (points, droites, plans, etc.) définis avec les mêmes données analytiques et rapportés à ces divers groupes d'axes sont des éléments *homologues* ou *de même espèce*.

L'opération qui représente le passage d'un premier système à un second sera une *opération de recouvrement* ([2]).

Il existe deux espèces d'axes coordonnés rectangulaires symétriques l'un de l'autre. On aura *une opération de recouvrement du premier genre* dans le système, quand l'opération représente le passage d'un système d'axe à un autre identique. L'opération est alors équivalente à un simple déplacement dans l'espace. Il y a *répétition* des mêmes éléments dans le système.

([1]) La théorie de la constitution des corps cristallisés n'est autre chose que la théorie générale de la *symétrie dans un milieu illimité* ayant une constitution périodique. C'est une théorie admirable qui a été édifiée par Bravais (recherches cristallographiques), par Jordan (*Annali di Matematica*, p. 167, 1868; p. 322, 1869) et par de Fedorow (*Société minéralogique de Saint-Pétersbourg*, 1879 à 1884, en langue russe; *Zeitschriff für Krystallographie*, t. XX, p. 25, 1892). Récemment, Schœnflies a donné un excellent Traité didactique de cette théorie (*Krystallsysteme und Krystallstruktur*; Leipzig, 1891).

Les corps cristallisés peuvent être divisés en 32 groupes, si l'on considère seulement la symétrie de la forme extérieure; mais la théorie prévoit, pour la structure interne de ces substances, 230 types de symétrie distincts. Si tous ces types se trouvent réalisés dans la nature, c'est pour les physiciens une véritable richesse, car ils ont alors à leur disposition 230 milieux doués de symétries différentes.

([2]) *Deck Operation* des cristallographes allemands.

On aura une *opération de recouvrement du deuxième genre ou transformation symétrique proprement dite,* lorsque l'opération représente le passage d'un système d'axes à un autre symétrique du premier. Le système est alors identique à son image obtenue par mirage.

On démontre facilement que, pendant les opérations de recouvrement d'un système limité, un point au moins reste toujours fixe dans l'espace. Il en résulte qu'établir tous les types de symétrie possibles d'un système limité revient à établir tous les *types de symétrie autour d'un point* qui est le centre de figure du système.

Les opérations de recouvrement du premier genre peuvent toujours être obtenues par une simple rotation autour d'un *axe de répétition* (plus généralement appelé *axe de symétrie*), passant par le point. L'axe d'ordre q (q nombre entier) donnera le recouvrement du système pour des rotations d'angles 0, 1, 2, ..., $(q-1)$ fois $\frac{2\pi}{q}$.

Nous considérerons une *direction* et un *sens* à chaque axe du système, ce qui double le nombre des axes; car, dans un axe, nous en compterons deux dirigés en sens contraires l'un de l'autre. Si ces deux axes de sens contraires sont d'espèce différente au point de vue des répétitions (par exemple l'axe d'une pyramide régulière) et d'ordre q, nous les désignerons par $(Lq\ lq)$.

Si ces deux axes de sens contraires sont de même espèce par répétition (exemple : l'axe principal d'un prisme) et d'ordre q, nous les désignerons par $(2Lq)$. On a alors un *axe doublé.* Dans ce cas, il existe nécessairement dans le système un axe de répétition d'ordre pair normal à l'axe doublé qui permet de renverser celui-ci sur lui-même par une rotation de 180° faisant partie des opérations de recouvrement du système.

Les opérations de recouvrement du deuxième genre peuvent toujours être obtenues par un mirage accompagné d'une rotation autour d'un axe normal au plan de mirage. Plusieurs cas sont à considérer :

1° La rotation est nulle; on a un simple mirage et le système a un *plan de symétrie,* — P.

2° La rotation est égale à 180°; on a un *centre de symétrie*, — C.

3° L'axe normal au plan est un axe de répétition d'ordre q et l'on a q transformations symétriques; chacune de ces opérations consiste en un mirage suivi d'une des rotations

$$0,\quad \frac{2\pi}{q},\quad 2\frac{2\pi}{q},\quad \ldots,\quad (q-1)\frac{2\pi}{q};$$

on a alors *un plan de symétrie direct d'ordre q*, nous le désignerons par Pq.

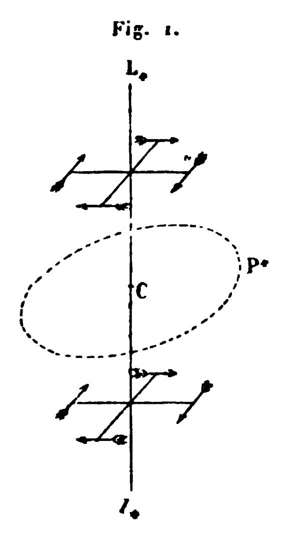
4° L'axe normal au plan est un axe de répétition d'ordre q, et l'on a q transformations symétriques; chacune de ces opérations consiste en un mirage suivi d'une des rotations

$$\frac{1}{2}\frac{2\pi}{q},\quad \left(1+\frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q},\quad \left(2+\frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q},\quad \ldots,\quad \left(q-1+\frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q}$$

autour de l'axe. On a alors *un plan de symétrie alterne d'ordre q* : nous le désignerons par πq.

Le modèle représenté (*fig.* 1) a un axe d'ordre 4 avec un plan P_4 de symétrie

Fig. 1.



directe d'ordre 4. Les quatre flèches inférieures sont obtenues par mirage direct des quatre flèches supérieures et réciproquement. On restitue le système par mirage simple ou accompagné d'une rotation d'un certain nombre de fois 90°.

Le modèle (*fig.* 2) a un axe d'ordre 4 avec un plan π_4 de symétrie alterne d'ordre 4, normal à sa direction. Les quatre flèches inférieures alternent en position avec les images obtenues par mirage direct des quatre flèches supérieures. On restitue le système par un mirage suivi d'une rotation d'un nombre impair de fois 45°.

On peut remarquer que le modèle de la *fig.* 2 est superposable à son

Fig. 2.

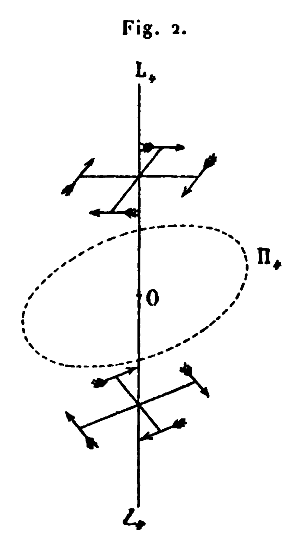


image vue dans une glace, bien qu'il ne possède ni plan ni centre de symétrie. Il a seulement un plan de symétrie alterne [1].

III. Les groupes d'opérations de recouvrement. — Toutes les opérations de recouvrement d'un système sont définies à l'aide des éléments de symétrie que nous venons d'énumérer.

Un *groupe* d'opérations de recouvrement sera une réunion d'opérations telles que deux quelconques des opérations effectuées successivement donneront le même résultat que celui qu'on obtient par une opération unique faisant partie du groupe.

Nous donnons ici le Tableau complet de tous les groupes d'opérations de recouvrement autour d'un point. Ces opérations sont complètement spécifiées par l'énumération des éléments de symétrie.

---

(1) P. Curie, *Bulletin de la Soc. minéral.* (*Sur ces questions d'ordre,* t. VII, p. 89; 1884. — *Sur la symétrie*, t. VII, p. 418; 1884).

Cl.	Axes de répétition.	*f.*	Transformations symétriques.	N.		Exemples.
I.	(Pas d'axe).	1	O	1		
		2	P	2		
		3	C	2		parallélipipède.
II.	$L_q l_q$ (un axe et son inverse).	4	O	q	$q=2$	acide tartrique.
		5	P_q	$2q$	$q=2$	gypse.
					$q=6$	apatite.
					$q=\infty$	champ magnétique.
		6	π_q	$2q$	$q=\infty$	champ magnétique.
					$q=3$	dioptase.
		7	qP	$2q$	$q=3$	tourmaline.
					$q=\infty$	champ électrique, tronc de cône.
III.	$2L_q, qL_2, ql'_2$ (un axe principal doublé).	8	O	$2q$	$q=3$	quartz.
					$q=\infty$	fil tordu.
		9	P_q, qP	$4q$	$q=3$	prisme triangulaire régulier.
					$q=\infty$	cylindre circulaire droit.
		10	π_q, qP	$4q$	$q=\infty$	cylindre circulaire droit.
					$q=3$	rhomboèdre, spath.
					$q=2$	sphénoèdre.
IV.	$4(L_3, l_3), 6L_2$ (axes du tétraèdre régulier).	11	O	12		chlorate de soude.
		12	$4\pi_3, 3P_2, C$	24		pyrite.
		13	$3\pi_2, 6P$	24		tétraèdre régulier, blende.
V.	$6L_4, 8L_3, 12L_2$ (axes du cube).	14	O	24		cuprite.
		15	$3P_4, 4\pi_3, 6P_2, C$	48		cube, octaèdre régulier.
VI.	$12L_5, 20L_3, 30L_2$ (axes de l'icosaèdre régulier).	16	O	60		
		17	$6\pi_5, 10\pi_3, 15P_2, C$	120		icosaèdre, dodécaèdre régulier.
VII.	∞L_∞ (axes de la sphère).	18	O	∞		sphère remplie de liquide, doué de pouvoir rotatoire.
		19	$\infty P_\infty, C$	∞		sphère.

Dans ce Tableau,

(Lq, lq) désignent un axe d'ordre q et celui de sens contraire d'une autre espèce,
($2Lq$) un axe d'ordre q doublé,
C un centre de symétrie,
P un plan de symétrie,
Pq un plan de symétrie directe d'ordre q,
πq un plan de symétrie alterne d'ordre q.

On voit que les groupes d'éléments de symétrie peuvent être partagés en *sept classes cl* se distinguant les unes des autres par la nature du groupe d'axes qu'elles contiennent. Chaque classe peut exister avec ou sans trans-

formation symétrique proprement dite. Il y a généralement plusieurs manières de donner la symétrie proprement dite à un groupe qui ne contient que des axes. On obtient en tout 19 *familles f*. Considérons, par exemple, la classe III et supposons $q = 3$, on aura le groupe d'axes $2L_3$, $(3L_2, 3L'_2)$, c'est-à-dire un axe principal doublé d'ordre 3, avec trois axes binaires et ceux de sens contraire d'une autre espèce $3(L_2, L'_2)$; ces trois axes sont normaux à l'axe principal et forment entre eux des angles de 120°. Ce système peut exister sans autre élément de symétrie [famille (8), forme cristalline du quartz], ou avec un plan de symétrie d'ordre 3 normal à l'axe principal (P_3) et 3 plans de symétrie 3P passant par l'axe principal et par les axes binaires [famille (9) prisme triangulaire]. On peut encore avoir un système symétrique [famille (10), rhomboèdre] avec un plan de symétrie alterne π_3 normal à l'axe principal, 3 plans de symétrie passant par l'axe principal et normaux aux axes binaires et un centre de symétrie.

Chaque famille des classes II et III contient une infinité de groupes, q peut être un nombre entier quelconque. Les familles des autres classes ne contiennent chacune qu'un seul groupe.

Dans les familles (5) et (9) il y a un centre de symétrie quand q est d'ordre pair. Dans les familles (6) et (10), il y a un centre de symétrie quand q est d'ordre impair.

Dans la classe III, les axes L_2 et L'_2 se confondent, mais sont de sens contraire l'un de l'autre si q est impair. On a, au contraire, des axes binaires doublés de deux espèces différentes si q est pair.

Les valeurs N donnent l'ordre de chaque groupe. N est le nombre de points homologues entre eux dans le système, lorsque les points considérés ne sont situés sur aucun axe ni sur aucun plan de symétrie. N est encore le nombre de systèmes d'axes coordonnés rectangulaires pour lequel le système se présente sous un même aspect.

Les systèmes ayant la symétrie des familles 1, 4, 8, 11, 14, 16, 18 qui ne contiennent que des axes ne sont pas superposables à leur image obtenue par mirage, ils possèdent la *dissymétrie énantiomorphe* [1].

Une notion très importante au point de vue qui nous occupe est celle des *intergroupes*. Un groupe d'éléments de symétrie est un intergroupe d'un groupe de symétrie plus élevée lorsque toutes les opérations de recouvrement du premier groupe font partie des opérations de recouvrement du second.

C'est ainsi, par exemple, que le groupe (13) à symétrie tétraédrique est un intergroupe du groupe (15) à symétrie cubique. Le groupe $(L_6 l_6)$, 6P de la famille (7) (symétrie d'une pyramide hexagonale régulière) est un

[1] Pour détails plus complets, voir les traités de cristallographie. *Voir* aussi Bravais, *Recherches cristallographiques;* Jordan, *Sur les groupes de mouvements* (*Annali di Matematica*, 1888); P. Curie, *loc. cit.*

intergroupe du groupe $\frac{2L_6}{P_6}$, $\frac{6L_2, 6L'_2}{6P_2}$ C de la famille (9) (prisme hexagonal régulier). Un groupe de (4) est un intergroupe des groupes (5), (6), (7), (8), (9), (10) pour une même valeur de q, etc.

IV. Dissymétrie caractéristique des phénomènes physiques. — Considérons maintenant un point quelconque d'un milieu dans un état physique quelconque. La symétrie en ce point sera nécessairement caractérisée par un des groupes du Tableau qui précède ([1]).

Nous énoncerons les propositions suivantes :

La symétrie caractéristique d'un phénomène est la symétrie maxima compatible avec l'existence du phénomène.

Un phénomène peut exister dans un milieu qui possède sa symétrie caractéristique ou celle d'un des intergroupes de sa symétrie caractéristique.

Autrement dit, certains éléments de symétrie peuvent coexister avec certains phénomènes, mais ils ne sont pas nécessaires. Ce qui est nécessaire, c'est que certains éléments de symétrie n'existent pas. *C'est la dissymétrie qui crée le phénomène.*

Il serait beaucoup plus logique d'appeler plan de dissymétrie tout plan qui ne serait pas un plan de symétrie; axe de dissymétrie tout axe qui ne serait pas un axe de symétrie, etc., et, d'une manière générale, de donner la liste des opérations qui ne sont pas des opérations de recouvrement dans ce système. Ce sont ces opérations-là qui indiquent une dissymétrie et, par conséquent, une propriété possible dans le système. Mais, dans les groupes que nous avons considérés, il y a un nombre infini d'opérations n'ame-

---

([1]) Certains esprits peuvent hésiter à transporter à un milieu dans un état physique quelconque une classification qui a été établie d'abord au point de vue de la Géométrie pure. Nous ferons remarquer que l'on peut ramener tous les raisonnements qui servent à l'établissement des groupes à la forme suivante : soient A, B, C trois systèmes d'axes coordonnés rectangulaires pour lesquels un système se présente sous un même aspect, soit D un quatrième système d'axes coordonnés rectangulaires qui est placé par rapport à C de la même façon que B par rapport à A ; D sera encore un système d'axes coordonnés pour lequel le système se présentera sous le même aspect que pour A, B, C. Le mode de raisonnement ne préjuge rien sur la nature du système.

nant pas le recouvrement et généralement un nombre fini d'opérations de recouvrement : il est donc beaucoup plus simple de donner la liste de ces dernières opérations.

On peut encore voir que quand plusieurs phénomènes de natures différentes se superposent dans un même système, les dissymétries s'ajoutent. Il ne reste plus alors comme éléments de symétrie dans le système que ceux qui sont communs à chaque phénomène pris séparément.

Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits.

Lorsque certains effets révèlent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance.

La réciproque de ces deux propositions n'est pas vraie, au moins pratiquement, c'est-à-dire que les effets produits peuvent être plus symétriques que les causes. Certaines causes de dissymétrie peuvent ne pas avoir d'action sur certains phénomènes ou du moins avoir une action trop faible pour être appréciée, ce qui revient pratiquement au même que si l'action n'existait pas.

Il y a intérêt, au point de vue des phénomènes physiques, à considérer à part les *groupes contenant un axe d'isotropie*. Ces groupes sont au nombre de cinq; nous les désignerons par (*a*), (*b*), (*c*), (*d*), (*e*).

(*a*) $\frac{2L_\infty}{P_\infty}, \frac{\infty L_2}{\infty P_2}$, C
Ex. : Cylindre, corps comprimé dans un sens.

(*b*) $2L_\infty, \infty L_2$
Cylindre tordu.

(*c*) $(L_\infty l_\infty), \infty P_1$
Tronc de cône. Champ électrique.

(*d*) $\frac{(L_\infty l_\infty)}{P_\infty}$, C
Cylindre tournant. Champ magnétique.

(*e*) $(L_\infty l_\infty)$

Le groupe cylindrique (*a*), le plus symétrique, possède les

éléments de symétrie du cylindre circulaire droit : c'est-à-dire un axe d'isotropie doublé $2L\infty$ avec une infinité d'axes binaires doublés ∞L_2 normaux à l'axe principal et passant par le centre de figure, un plan de symétrie directe P_∞ d'ordre ∞ normal à l'axe principal, une infinité de plans de symétrie directe ∞P_2, d'ordre 2, passant par l'axe principal, un centre de symétrie C.

Lorsque l'on comprime dans un sens un corps isotrope, il devient anisotrope et possède la symétrie du groupe cylindrique (*a*). On sait qu'un corps ainsi comprimé a les propriétés optiques des cristaux à un axe optique; la symétrie (*a*) est précisément la symétrie maxima compatible avec l'existence de ce phénomène. Les corps cristallisés à un axe optique ont des symétries qui sont des intergroupes de la symétrie (*a*).

Les autres groupes (*b*), (*c*), (*d*), (*e*), à axe d'isotropie, sont des intergroupes du groupe cylindrique (*a*).

Le groupe (*b*) possède toujours l'axe d'isotropie doublé et les axes binaires; mais il ne possède plus ni centre ni plans de symétrie. Le groupe (*b*) est l'intergroupe holoaxe du groupe (*a*). Le groupe (*b*) a la symétrie d'un cylindre ou d'un fil que l'on a tordu autour de son axe. C'est la symétrie du centre de figure d'un système formé de deux cylindres identiques ayant leurs axes dans le prolongement l'un de l'autre et tournant chacun autour de cet axe avec des vitesses angulaires égales et de signes contraires. La *symétrie de torsion* (*b*) ne contenant que des axes de répétition, possède la dissymétrie non superposable (énantiomorphie) qui est nécessaire pour le phénomène de la polarisation rotatoire ordinaire des corps actifs. On peut encore dire que la symétrie (*b*) est réalisée lorsque l'on remplit un cylindre d'un liquide doué de la polarisation rotatoire. La forme cristalline du quartz $2L_3$, $3(L_2L'_2)$ a la symétrie d'un intergroupe de (*b*).

Le groupe (*c*) possède un axe d'isotropie et celui de sens contraire d'une autre espèce ($L\infty\, l\infty$); cet axe n'est donc plus doublé, (autrement dit, l'axe ne se présente plus de la même façon par les deux bouts). Le groupe (*c*) a encore une infinité de plans de symétrie passant par l'axe d'isotropie; mais il ne possède plus, ni le plan de symétrie normal à l'axe, ni le centre de symétrie, ni les axes binaires du groupe cylindrique. C'est la symétrie en un point quelconque de l'axe d'un tronc de cône circulaire droit. C'est la

symétrie d'une force, d'une vitesse, d'un champ où s'exerce l'attraction universelle; c'est encore la *symétrie du champ électrique*. Tous ces phénomènes sont très convenablement représentés par une flèche au point de vue spécial de la symétrie.

Considérons, par exemple, le champ de l'attraction universelle; une sphère matérielle M, dont le centre est en un point O, agit en un point extérieur A, de manière à y créer un champ où peut s'exercer l'action de l'attraction newtonienne. Si nous supposons que la matière M n'apporte par elle-même aucune dissymétrie, nous voyons que la ligne OA est un axe d'isotropie, que tout plan passant par OA est un plan de symétrie, et ce sont là les seuls éléments de symétrie passant par le point A. C'est la symétrie du groupe (*c*). Donc le champ de l'attraction newtonienne pourra se rencontrer dans un milieu possédant la symétrie de (*c*) ou d'un de ses intergroupes; du reste, on ne peut imaginer que la symétrie puisse être supérieure à (*c*), car elle devrait être dans ce cas la symétrie du groupe cylindrique (*a*) ou celle du groupe sphérique (19) et le champ n'aurait pas de *sens* et il en serait de même des forces et des vitesses. Si nous plaçons en A une sphère matérielle, on aura une force agissant sur cette matière. Le corps pourra se mettre en mouvement dans la direction AO et prendre une certaine vitesse et rien là dedans ne troublera la symétrie du système; donc (*c*) représente en même temps la symétrie d'une force agissant sur la matière pondérable et la symétrie de la matière animée d'une certaine vitesse.

Pour établir la symétrie du champ électrique, supposons que ce champ soit produit par deux plateaux circulaires de zinc et de cuivre placés en face l'un de l'autre, comme les armatures d'un condensateur à air. Considérons entre les deux plateaux un point de l'axe commun, nous voyons que cet axe est un axe d'isotropie et que tout plan passant par cet axe est un plan de symétrie. Les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits; donc le champ électrique est compatible avec la symétrie de (*c*) et de ses intergroupes.

Le groupe (*a*) à symétrie cylindrique et le groupe (19) à symétrie sphérique sont les seuls ayant pour intergroupe (*c*). Il n'est donc pas vraisemblable que le champ électrique puisse avoir une symétrie supérieure à (*c*). Ce dernier point peut du reste être démontré

rigoureusement si l'on admet, comme nous l'avons vu plus haut, que la force agissant sur un corps pondérable a elle-même pour symétrie caractéristique le groupe (c). Supposons, en effet, qu'une sphère conductrice chargée d'électricité soit isolée dans l'espace, puis que l'on fasse naître un champ électrique par une cause quelconque. Une force agira sur la sphère dans la direction du champ. La dissymétrie des effets doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance; la force ne possédant pas d'axe de symétrie normal à sa direction, le système de la sphère chargée et du champ ne doit pas non plus posséder cet élément de symétrie. Mais la sphère chargée, considérée isolément, possède des axes d'isotropie dans toutes les directions; la dissymétrie en question provient donc du champ électrique qui ne doit pas posséder d'axe de symétrie normal à sa direction. Le champ électrique ne peut donc pas avoir la symétrie cylindrique ou sphérique, et sa symétrie caractéristique est celle du groupe (c). La symétrie du courant électrique et celle de la polarisation diélectrique est nécessairement la même que celle du champ qui donne naissance à ces phénomènes.

Les phénomènes pyroélectriques et piézoélectriques viennent apporter un nouvel appui aux conclusions qui précèdent sur la symétrie caractéristique du champ électrique. Un cristal de tourmaline, par exemple, se polarise électriquement dans la direction de son axe ternaire lorsque l'on échauffe le cristal ou lorsqu'on le comprime dans la direction de l'axe. Or l'échauffement ou cette compression ne modifient en rien la symétrie du cristal qui est $(L_3, l_3)3P$, un axe ternaire (avec l'axe de sens contraire d'une autre espèce) par lequel passe trois plans de symétrie; c'est là un intergroupe de $(c)(L\infty l\infty)\infty P$, la symétrie est par conséquent compatible avec l'existence d'une polarisation *diélectrique suivant l'axe*.

Enfin, nous remarquerons que le champ électrique détermine dans les liquides les mêmes phénomènes optiques que ceux donnés par compression des solides (phénomènes de Kerr). La symétrie caractéristique de ces phénomènes est la symétrie cylindrique (a) dont le groupe (c) est un intergroupe; on voit donc qu'une partie seulement de la dissymétrie caractéristique du champ électrique est révélée par le phénomène de Kerr. Les phé-

nomènes de dilatation électrique (phénomène Duter) ne révèlent de même que la dissymétrie du groupe (a).

Le groupe (d) possède un axe d'isotropie et l'axe de sens contraire d'une autre espèce ($L\infty\, l\infty$) : cet axe n'est donc pas doublé par répétition ; mais le système possède un centre de symétrie et un plan de symétrie d'ordre ∞ normal à l'axe. Les axes $L\infty$ et $l\infty$ de sens contraires sont donc symétriques l'un de l'autre, et l'on peut dire que l'axe d'isotropie est doublé par symétrie. Le groupe ne possède ni les axes binaires, ni les plans de symétrie passant par l'axe principal du groupe cylindrique (a). Le groupe (d) donne la symétrie ou centre de figure d'un cylindre circulaire droit qui tourne autour de son axe avec une certaine vitesse. C'est encore à cette symétrie qu'il faut rapporter un couple, une vitesse angulaire, *un champ magnétique.*

Établissons, par exemple, la symétrie caractéristique du champ magnétique. Considérons pour cela le champ magnétique qui existe au centre d'une circonférence parcourue par un courant électrique ; le champ est dirigé normalement au plan de la circonférence. Cherchons la symétrie des causes, c'est-à-dire la symétrie au centre de la circonférence parcourue par le courant. On aura d'abord un axe d'isotropie normal au plan du courant. Le courant électrique est compatible avec l'existence de plans de symétrie passant par la direction du courant ; le plan de la circonférence sera donc un plan de symétrie. Le courant électrique n'admet ni axe de répétition, ni plan de symétrie normal à sa direction. Il n'y a donc pas d'axe dans le plan du cercle ni de plans de symétrie passant par l'axe d'isotropie. La symétrie des causes est donc le groupe (d) $\frac{(L\infty\, l\infty)}{P\infty}C$. Ces éléments de symétrie sont compatibles avec l'existence d'un champ magnétique passant par l'axe d'isotropie ; puisque les éléments de symétrie des causes se retrouvent dans les effets produits.

On voit qu'un champ magnétique peut posséder un plan de symétrie normal à sa direction. Le champ magnétique est, au contraire, incompatible avec la présence d'un axe binaire normal à sa direction. Pour le prouver, nous allons nous servir des phénomènes d'induction. Considérons, par exemple, un fil rectiligne animé

d'une certaine vitesse normale à sa direction. Un pareil système possède un axe binaire dans le sens de la vitesse. Supposons maintenant qu'un champ magnétique existe dans la direction normale au fil et à la vitesse de déplacement; une force électromotrice d'induction naîtra dans le fil. Ce phénomène est incompatible avec la présence d'un axe binaire dirigé dans le sens du déplacement, c'est-à-dire normal au fil. La dissymétrie des effets doit se retrouver dans les causes; la disparition nécessaire de l'axe binaire dont nous avons parlé ne peut provenir que de la présence du champ magnétique; celui-ci ne peut donc pas avoir d'axe binaire normal à sa direction. (La même démonstration pourrait se faire en considérant un circuit circulaire normal à un champ magnétique. On supposerait que ce circuit se dilate sans changer de forme en donnant naissance à un courant d'induction.)

Les groupes cylindriques (a) et sphériques (19) ont pour intergroupe (d), mais l'existence des axes normaux entre eux dans ces groupes montre qu'ils ne peuvent convenir pour représenter la symétrie du champ magnétique. Le champ magnétique est donc seulement compatible avec le groupe (d) et ses intergroupes [1].

Le phénomène de la polarisation rotatoire magnétique vient encore confirmer cette conclusion [2].

Un corps polarisé magnétiquement possède la même symétrie que le champ magnétique.

Les phénomènes de dilatation magnétique du fer révèlent seulement la dissymétrie du groupe cylindrique (a) dont (d) est un intergroupe.

Un grand nombre de cristaux sont caractérisés par des groupes de symétrie qui sont des intergroupes de la symétrie magnétique, tels

(1) P. Curie, *loc. cit.*, 1884, et *Archives des Sc. phys. et nat.*, t. XXIX; 1893. Lord Kelvin a été amené à supposer que l'aimantation est due à une déformation d'un milieu particulier. Cette déformation est simplement une rotation, qui, dans ce milieu tout spécial, provoque la naissance d'un couple élastique antagoniste. Voir *Traduction des Conférences de Sir Thomson*, Note de M. Brillouin. Cette conception est en complet accord avec la symétrie qui précède.

(2) Pour traiter convenablement la question de la polarisation rotatoire au point de vue de la symétrie, il faut faire intervenir les éléments de symétrie propres aux milieux illimités dont nous n'avons pas parlé. Un corps parcouru par un rayon de lumière polarisé circulairement possède par exemple un axe hélicoïdal d'isotropie.

que ceux d'apatite $\frac{L_6 l_6}{P_6}$ C, de gypse, de chlorure de fer, d'amphibole $\frac{L_2 l_2}{P_2}$, C. Il pourrait se faire que ces cristaux fussent aimantés naturellement de par leur constitution ; j'ai cherché sans succès à constater cette polarité par expérience.

On a coutume de représenter un champ magnétique par une flèche ; cette représentation, qui n'offre souvent aucun inconvénient, est défectueuse au point de vue spécial de la symétrie, puisque le champ magnétique n'est pas modifié par un mirage par rapport à un plan normal à sa direction et qu'il est changé de sens par un mirage par rapport à un plan passant par sa direction. C'est précisément le contraire qui se passe pour la flèche représentative.

Le groupe (*e*) possède seulement un axe d'isotropie ($L\infty\, l\infty$) non doublé. Le groupe (*e*) est un intergroupe commun aux quatre groupes (*a*), (*b*), (*c*), (*d*) ; il possède les dissymétries réunies de ces quatre groupes. Il est, par conséquent, compatible avec l'existence des phénomènes qui ont pour symétrie caractéristique l'un quelconque des quatre autres groupes. Le groupe (*e*) possède la dissymétrie énantiomorphe.

Les cinq groupes (*a*), (*b*), (*c*), (*d*), (*e*) sont reliés entre eux à la manière des types de symétrie d'un même système cristallin. Si nous empruntons le langage des cristallographes, nous dirons que le groupe (*a*) donne la symétrie complète ou holoédrique du système cylindrique. Le groupe (*b*) correspond à hémiédrie holoaxe (hémièdrie plagièdre ou hémiédrie énantiomorphe). Le groupe (*c*), à l'hémiédrie hémimorphe (hémiédrie à faces inclinées). Le groupe (*d*), à la parahémiédrie (hémiédrie à faces parallèles) ; enfin, le groupe (*e*) correspond à la tétartoédrie.

Bien que chaque groupe contienne un nombre infini de transformations de recouvrement, on peut cependant dire que les groupes (*b*), (*c*) et (*d*) ne renferment que la moitié et le groupe (*e*) que le quart des opérations de recouvrement du groupe (*a*).

Le modèle représenté dans les *fig.* 3, 4, 5, 6, 7 donne pour diverses orientations des flèches les divers intergroupes à axe principal d'ordre 4 des groupes (*a*), (*b*), (*c*), (*d*), (*e*).

La *fig.* 3 donne [famille (9) $q = 4$] l'intergroupe du groupe (*a*) cylindrique ; c'est la symétrie du prisme droit à base carrée. Par l'axe principal passent quatre plans de symétrie, deux d'une première espèce passent par les flèches, les deux autres d'une deuxième espèce sont bissecteurs des angles que forment entre eux les premiers. Les positions des axes binaires doublés L_2 et L'_2 et du plan P_4 normal à l'axe sont indiquées sur la figure.

La *fig.* 4 [famille (8) énantiomorphe, $q = 4$] donne un intergroupe de

la symétrie de torsion (b); c'est la symétrie d'un cristal de sulfate de strychnine.

La *fig.* 5 [famille (7), $q = 4$] donne un intergroupe de la symétrie du champ électrique (c), il y a quatre plans de symétrie passant par l'axe : c'est précisément le type de symétrie d'un cristal de calamine qui est à la fois piézoélectrique et pyroélectrique.

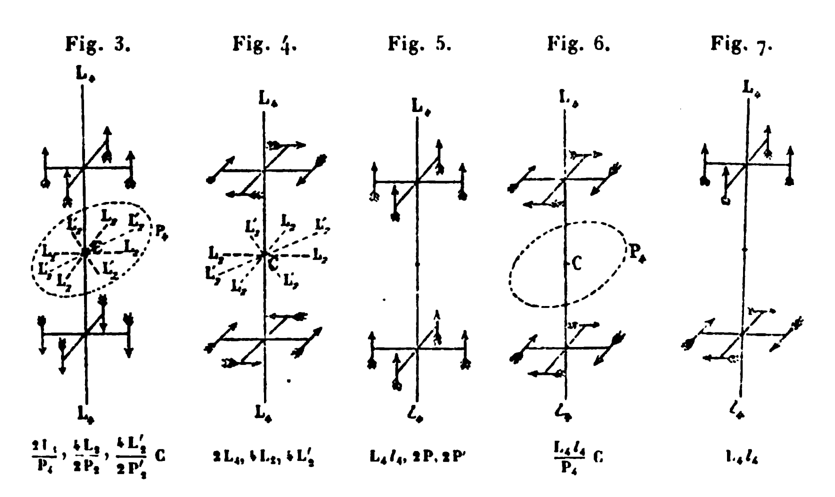


Fig. 3. $\frac{2L_4}{P_4}, \frac{4L_2}{2P_2}, \frac{4L'_2}{2P'_2}\, C$ — Fig. 4. $2L_4, 4L_2, 4L'_2$ — Fig. 5. $L_4 l_4, 2P, 2P'$ — Fig. 6. $\frac{L_4 l_4}{P_4}\, C$ — Fig. 7. $L_4 l_4$

La *fig.* 6 [famille (5), $q = 4$] donne un intergroupe de la symétrie magnétique (d); c'est la symétrie des cristaux de schéelite et d'érythrite.

Enfin la *fig.* 7 [famille (4) énantiomorphe, $q = 4$] donne un intergroupe du groupe (e), à axe d'isotropie (cristal de penta-érythrite). Dans la *fig.* 7, les flèches du bas entraînent la dissymétrie du champ magnétique, les flèches du haut celle du champ électrique. La réunion de ces flèches entraîne l'idée d'une dissymétrie de torsion, car un mobile qui tournerait autour de l'axe dans le sens des flèches inférieures, tout en avançant parallèlement à l'axe dans le sens des flèches supérieures, décrirait une hélice.

V. Superposition des causes de dissymétrie dans un même milieu. — Lorsque deux phénomènes de nature différente se superposent dans un même milieu, les dissymétries s'ajoutent. Si l'on superpose les causes de dissymétrie de deux des trois groupes (b), (c), (d), en faisant cependant coïncider les axes d'isotropie, on obtient le groupe (e), car l'axe d'isotropie sera le seul élément de symétrie commun aux deux groupes superposés. Or (e) possède les dissymétries réunies des trois groupes. Donc, en faisant coïncider, comme nous venons de le dire, les causes de dissymétrie de

deux des trois groupes (*b*), (*c*), (*d*), on obtiendra la dissymétrie caractéristique du troisième groupe.

Supposons, par exemple, que nous superposions dans un corps *un champ électrique* (*c*) *et un champ magnétique* (*d*) *de même direction,* l'axe d'isotropie subsistera seul; la présence du champ électrique est incompatible avec l'existence d'un centre et d'un plan de symétrie normal à l'axe, et la présence du champ magnétique nécessite la disparition des plans de symétrie passant par l'axe. La symétrie est donc celle de (*e*) qui est un intergroupe de (*b*) : on aura donc la dissymétrie de torsion dans le corps. Prenons, par exemple, un fil de fer, aimantons-le dans le sens de sa longueur; puis faisons-le parcourir par un courant, le fil se tord (expérience de Wiedemann).

Il est peut-être possible de créer un milieu capable de donner la polarisation rotatoire des corps actifs en superposant dans un corps symétrique un champ électrique et un champ magnétique. Du moins, ceci ne serait pas en contradiction avec les conditions de symétrie. Dans le sens de l'axe, on pourrait avoir superposition d'un phénomène de polarisation rotatoire magnétique (c'est-à-dire changeant de sens avec le sens de la propagation de la lumière) et d'un phénomène de polarisation rotatoire ordinaire. Normalement à l'axe, on pourrait avoir un pur phénomène de polarisation rotatoire ordinaire. Un pareil milieu à symétrie énantiomorphe permettrait peut-être encore de réaliser certaines réactions chimiques dissymétriques, ou de séparer les corps droits et gauches dans une combinaison racémique, ou encore de faire déposer d'une solution sous une forme unique, les corps à molécules symétriques, comme le chlorate de soude, qui se déposent ordinairement en cristaux dissymétriques droits et gauches mélangés.

Au contraire, un champ électrique ou un champ magnétique ne sauraient isolément provoquer une réaction dissymétrique, puisque ces phénomènes sont compatibles avec l'existence d'un plan de symétrie.

Supposons maintenant que nous superposions *une dissymétrie de torsion* (*b*) et *une dissymétrie magnétique* (*d*), on obtiendra encore la symétrie (*e*) qui est un intergroupe de la symétrie du champ électrique (*c*).

Prenons un fil de fer, aimantons-le et tordons-le. Au moment où la torsion se produit, une force électromotrice prend naissance dans le fil qui est parcouru par un courant s'il est placé dans un circuit fermé (expérience de Wiedemann).

Les conditions de symétrie nous montrent qu'il pourrait se faire qu'un corps à molécules dissymétriques (doué de pouvoir rotatoire ordinaire) se polarisât diélectriquement lorsqu'on le place dans un champ magnétique.

Enfin, supposons que nous superposions une *dissymétrie de torsion* (*b*) et *un champ électrique* (*c*), on aura de même la symétrie de (*e*) qui est un intergroupe de la symétrie magnétique. Un fil de fer parcouru par un courant s'aimante dans le sens de sa longueur quand on le tord (expérience de Wiedemann).

Les conditions de symétrie nous permettent d'imaginer qu'un corps à molécule dissymétrique se polarise peut-être magnétiquement lorsqu'on le place dans un champ électrique.

Phénomène de Hall. — Superposons encore un champ électrique (*c*) et un champ magnétique (*d*) dans un même milieu, mais en orientant à angle droit l'un de l'autre la direction des deux champs. Dans ces conditions, le seul élément de symétrie commun aux deux champs est un plan de symétrie passant par la direction du champ électrique et normal au champ magnétique. On aura donc pour toute symétrie un plan P [groupe 4].

De part et d'autre du plan, les phénomènes devront être symétriques, mais, dans le plan, la symétrie n'indique plus aucune condition. Considérons, par exemple, trois axes rectangulaires et une lame métallique rectangulaire normale à un axe ox qui passe par son centre de figure, ses côtés étant parallèles aux autres axes oy et oz. Si un courant parcourt la lame suivant l'axe des z, il ne saurait y avoir une force électromotrice suivant l'axe des y, puisque le plan zox est un plan de symétrie pour le courant et pour la lame. Si l'on n'a pas de courant, mais si l'on a, suivant l'axe des x, normalement à la lame, un champ magnétique, il ne peut pas non plus y avoir de courant suivant l'axe des y, puisque l'axe des x est un axe binaire pour le champ et pour la lame et, de plus, il a un centre de symétrie. Si, maintenant, on a à la fois le champ magnétique suivant l'axe des x et le courant suivant l'axe

des z, l'axe, le centre, le plan de symétrie disparaissent et rien ne s'oppose plus, au point de vue de la symétrie, à ce qu'une force électromotrice se montre suivant l'axe des y.

La théorie de la propagation de la chaleur et de l'électricité dans les corps cristallisés (Stokes, Thomson, Minnigerode, Boussinesq) montre que, pour certains cristaux, il y a lieu de tenir compte de certains coefficients dits *rotationnels*. Les cristaux en question sont ceux des familles (5) $\frac{Lq\,lq}{Pq}$ et (6) $\frac{Lq\,lq}{\pi q}$ et de leurs intergroupes (1), (2), (3), (4). Ces cristaux possèdent au maximum un axe d'ordre q normal à un plan de symétrie direct ou alterne d'ordre q, q étant un nombre entier quelconque. Un corps polarisé magnétiquement possède la symétrie (d) $\frac{L\infty\,l\infty}{P\infty}$, qui est un cas limite des groupes (5) et (6) pour $q = \infty$. Tous les cristaux qui, d'après la théorie, peuvent avoir des coefficients rotationnels ont pour type de symétrie un des intergroupes de la symétrie magnétique.

La théorie édifiée pour les corps cristallisés s'applique admirablement à la symétrie magnétique, et l'existence des coefficients rotationnels explique toutes les particularités du phénomène de Hall, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir autre chose que la symétrie du champ dans la théorie de la conductibilité.

Si l'on fait arriver l'électricité par le centre d'un disque métallique placé normalement au champ magnétique et si cette électricité est recueillie uniformément sur les bords du disque, les lignes décrites par le flux électrique doivent être des spirales (Boltzmann) [1].

---

[1] Ce qui est fort curieux, c'est que les cristaux pour lesquels la théorie de Stokes avait été faite se montrent réfractaires, et M. Soret a, sans succès, recherché les effets des coefficients rotationnels dans le gypse pour la conductibilité calorifique. Le phénomène de Hall a été seulement constaté avec des métaux et le gypse est un diélectrique. Les coefficients rotationnels se feraient peut-être sentir avec un corps métallique cristallisé présentant la dissymétrie nécessaire; mais je ne crois pas que l'on possède actuellement une substance convenable pour tenter l'expérience.

Pour la théorie de la conductibilité calorifique dans les cristaux, voir le récent article de M. Soret dans le *Journal de Physique*, 1893; t. III, 2ᵉ sér., p. 241. Lord Kelvin a été le premier à remarquer que le phénomène de Hall donnait une démonstration de l'existence des termes rotationnels (W. THOMSON, *Mathem. and Phys. Papers*, t. I, p. 281).

Phénomènes pyroélectriques et piézoélectriques. — Les cristaux pyroélectriques ont nécessairement la symétrie d'un intergroupe du champ électrique, puisque l'échauffement supposé uniforme n'amène par lui-même aucune dissymétrie. Les cristaux piézoélectriques sont plus nombreux que les cristaux pyroélectriques. Ils comprennent, en effet, tous ceux-ci, puis ils renferment des cristaux qui prennent seulement, sous l'influence des efforts mécaniques, une symétrie inférieure à celle d'un champ électrique. La blende par exemple (cristal tétraédrique) et le quartz ont des symétries qui ne sont pas des intergroupes du champ électrique. Le quartz a la symétrie $2L_3$, $3(L_2L'_2)$, un axe principal ternaire doublé et trois axes binaires non doublés normaux à cet axe. En comprimant suivant un axe binaire par exemple, on ajoute la dissymétrie cylindrique (*a*) à celle du quartz; il ne reste plus comme éléments que (L_2, L'_2), un axe binaire non doublé qui peut devenir une direction de polarité électrique.

On peut montrer de même qu'en comprimant dans la direction normale à la fois à un axe binaire et à un axe ternaire, on fera naître encore une polarité suivant l'axe binaire et que les coefficients qui interviennent pour caractériser ces deux modes de développement de la polarité sont égaux et de signes contraires. On peut ainsi prévoir certaines particularités du phénomène; mais ces conditions de symétrie ne sont pas les seules qui interviennent dans la théorie générale ([1]).

VI. Liaisons entre les symétries caractéristiques des divers milieux. — Nous avons supposé que la matière non cristallisée et non douée de pouvoir rotatoire n'apportait par elle-même aucune dissymétrie dans un système; nous avons fait implicitement la même supposition pour le milieu qui remplit les espaces vides de matière. Cette supposition bien naturelle, mais toute gratuite, est indispensable; elle montre bien que nous ne pouvons avoir notion de la symétrie absolue; nous devons choisir arbitrairement une symétrie pour un certain milieu et en déduire la symétrie des autres

---

([1]) La théorie générale complète des propriétés piézoélectriques des cristaux a été établie par Voigt (*All. Ges. der Wiss.*, Göttingen, 1890. — *Wied. Ann.*, t. XLV, p. 523; 1892).

milieux. Cette symétrie relative est, du reste, la seule qui nous intéresse. Si, par exemple, tout un système est animé d'une certaine vitesse et que nous considérions un certain corps A dans le système, il nous sera utile de connaître en général la symétrie du corps A par rapport au système, sans tenir compte de la dissymétrie commune créée par l'état de mouvement de tout le système.

Supposons que nous connaissions seulement en électricité les phénomènes généraux de l'électricité statique, de l'électricité dynamique, du magnétisme, de l'électro-magnétisme et de l'induction, rien ne nous indiquerait exactement le type de symétrie qu'il convient d'attribuer au champ électrique et au champ magnétique. Nous pourrions, par exemple, choisir pour le champ magnétique la symétrie (c) (que nous avons attribuée plus haut au champ électrique) et, en raisonnant comme nous l'avons fait, nous serions conduits alors nécessairement à prendre pour symétrie du champ électrique le groupe (d) (que nous avons attribué plus haut au champ magnétique). Il n'y aurait aucune absurdité à un pareil système, ni aucune contradiction avec notre hypothèse initiale sur la symétrie complète de la matière.

Les phénomènes généraux de l'électricité et du magnétisme nous indiquent donc seulement une *liaison entre les symétries* du champ électrique et du champ magnétique, de telle sorte que, si l'on adopte (c) pour la symétrie de l'un, il faut admettre (d) pour la symétrie de l'autre, et réciproquement. Pour lever cette indétermination, il faut faire intervenir d'autres phénomènes, les phénomènes électrochimiques ou d'électricité de contact, les phénomènes pyro ou piézoélectriques, ou encore le phénomène de Hall, ou celui de la polarisation rotatoire magnétique.

Les *dimensions* des grandeurs électriques et magnétiques nous présentent un exemple d'indétermination tout à fait comparable à celui que nous venons de citer pour la *symétrie* des milieux électriques et magnétiques. Les phénomènes généraux de l'électricité et du magnétisme sont de même incapables de lever cette indétermination, il faudrait, pour y parvenir, faire intervenir d'autres phénomènes, les phénomènes électrochimiques, par exemple [1].

---

[1] M. Abraham a déjà fait une tentative dans ce sens (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXVI, p. 1123; 1893).

VII. En résumé, les symétries caractéristiques des phénomènes ont un intérêt général incontestable. Au point de vue des applications, nous voyons que les conclusions que nous pouvons tirer des considérations relatives à la symétrie sont de deux sortes :

Les premières sont des conclusions fermes mais négatives, elles répondent à la proposition incontestablement vraie : *Il n'est pas d'effet sans causes*. Les effets, ce sont les phénomènes qui nécessitent toujours, pour se produire, une certaine dissymétrie. Si cette dissymétrie n'existe pas, le phénomène est impossible. Ceci nous empêche souvent de nous égarer à la recherche de phénomènes irréalisables.

Les considérations sur la symétrie nous permettent encore d'énoncer une deuxième sorte de conclusions, celles-ci de nature positive, mais qui n'offrent pas la même certitude dans les résultats que celles de nature négative. Elles répondent à la proposition : *Il n'est pas de cause sans effets*. Les effets, ce sont les phénomènes qui peuvent naître dans un milieu possédant une certaine dissymétrie; on a là des indications précieuses pour la découverte de nouveaux phénomènes; mais les prévisions ne sont pas des prévisions précises comme celles de la Thermodynamique. On n'a aucune idée de l'ordre de grandeur des phénomènes prévus : on n'a même qu'une idée imparfaite de leur nature exacte. Cette dernière remarque montre qu'il faut se garder de tirer une conclusion absolue d'une expérience négative.

Considérons, par exemple, un cristal de tourmaline qui possède une symétrie qui est un intergroupe de la symétrie du champ électrique. On en conclut que le cristal est peut-être polarisé électriquement. Plaçons le cristal dans un champ électrique, l'axe orienté à 90° du champ; la polarisation ne se montre en aucune sorte, on n'a pas de couple appréciable agissant sur le cristal, et l'on serait porté à penser que le cristal n'est pas polarisé ou que, si la polarisation existe, elle est plus petite que celle que l'on pourrait évaluer. Cependant la polarisation existe et, pour la faire apparaître, il faut modifier l'expérience, échauffer le cristal uniformément, par exemple, ce qui ne change cependant rien à sa symétrie.

Sur la possibilité d'existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre;

Par M. P. Curie.

Le parallélisme des phénomènes électriques et magnétiques nous amène naturellement à nous demander si cette analogie est plus complète. Est-il absurde de supposer qu'il existe des corps conducteurs du magnétisme, des courants magnétiques ([1]), du magnétisme libre?

Il convient d'examiner si des phénomènes de ce genre ne seraient pas en contradiction avec les principes de l'Énergétique ou avec les conditions de symétrie. On constate qu'il n'y aurait aucune contradiction. Un courant magnétique dégagerait de la chaleur; il aurait la symétrie du champ magnétique qui lui a donné naissance et jouirait de la curieuse propriété, pour un courant, d'être symétrique par rapport à un plan normal à sa direction. Le courant de magnétisme créerait un champ électrique comme le courant électrique crée un champ magnétique et suivant les mêmes lois.

Une sphère isolée dans l'espace et chargée de magnétisme libre serait caractérisée par le groupe sphérique (18)$\infty L\infty$, énantiomorphe, c'est-à-dire une infinité d'axes d'isotropie doublés passant par le centre de la sphère dans toutes les directions; mais pas de centre et aucun plan de symétrie. En effet, la sphère est entourée de champs magnétiques tous orientés suivant les rayons et tous dirigés vers l'extérieur, si la sphère est chargée de magnétisme austral, ou vers l'intérieur, si elle est chargée de magnétisme boréal. Il ne peut y avoir de plan de symétrie passant par un rayon, puisque l'existence d'un champ magnétique n'est pas compatible avec celle d'un plan de symétrie passant par sa direction. Au contraire, rien ne s'oppose à l'existence des axes d'isotropie, on a donc le groupe (18).

Si l'on pouvait placer une sphère chargée de magnétisme libre

---

([1]) M. Vaschy a déjà posé cette question (*Traité d'Électricité et de Magnétisme*).

dans un champ magnétique, on aurait une force, et ceci semble à première vue en contradiction avec l'existence du plan de symétrie normal au champ. La disparition du plan de symétrie est précisément due à la dissymétrie caractéristique du magnétisme libre. La symétrie du champ magnétique est $(d)\ \frac{L\infty l\infty}{P\infty}C$, celle de la sphère chargée $(18)\infty L\infty$; en superposant les dissymétries, il reste seulement $(L\infty l\infty)$ groupe (e), qui est un intergroupe de la symétrie d'une force groupe $(c)\ (L\infty, \infty P)$.

Un corps chargé de magnétisme libre serait donc nécessairement dissymétrique énantiomorphe, c'est-à-dire non superposable à son image obtenue par mirage. Deux sphères chargées respectivement de quantités égales de magnétisme austral et boréal seraient symétriques l'une de l'autre. On voit qu'il n'y aurait rien d'absurde, au point de vue de la symétrie, à supposer que les molécules dissymétriques douées de pouvoir rotatoire soient naturellement chargées de magnétisme libre (¹).

Ainsi, au point de vue de l'énergétique, au point de vue de la symétrie, on peut concevoir sans absurdité les courants de magnétisme et les charges de magnétisme libre. Il serait certes téméraire d'induire de là que ces phénomènes existent réellement. Si cependant il en était ainsi, ils devraient satisfaire aux conditions que nous avons énoncées.

(¹) Si la conductibilité magnétique existait, un transformateur analogue aux transformateurs à courant alternatif, mais à noyau annulaire conducteur du magnétisme, transformerait un courant continu en un autre courant continu. J'ai essayé si le fer donnait un phénomène de ce genre, mais je n'ai obtenu aucun effet. Un tore de fer doux était recouvert de quelques couches de fil qui faisait partie du circuit d'un galvanomètre très sensible. On faisait circuler un fort courant constant dans une autre série de couches de fils. Les deux circuits étaient séparés par un tube de plomb enroulé sur le premier circuit et dans lequel passait un courant d'eau, de façon à éviter l'échauffement du premier circuit par le courant du second. Tant que le fer n'est pas saturé, on a des déviations au galvanomètre dues visiblement aux trépidations inévitables qui facilitent l'aimantation du fer. Quand le courant est assez intense pour que le fer soit déjà fortement aimanté, on n'a plus rien de sensible. Il convient de remarquer que cette méthode, fondée sur l'observation d'un effet dynamique, ne permettrait pas d'apprécier une très faible conductibilité magnétique.

SÉANCE DU 2 FÉVRIER 1894.

Présidence de M. Cailletet.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 19 janvier est lu et adopté.

Est élu membre de la Société :

M. Henry, Professeur au Lycée de Chartres.

MM. Louguinine et Michelson, élus membres du Conseil, adressent leurs remercîments à la Société.

M. Paul Bary expose les résultats obtenus dans ses expériences sur la variation de l'indice de réfraction avec le degré de concentration des solutions aqueuses de sels. Il constate que cette loi est discontinue et se représente graphiquement par une ligne brisée; chaque point d'intersection des droites qui la composent indique qu'il existe en ce point de la courbe un changement brusque de composition de la solution; on peut en conclure qu'il se forme dans la liqueur des hydrates dont la formule est donnée par les rapports moléculaires de sel et d'eau que contient le liquide aux points singuliers décelés par l'expérience.

Les faits observés sur les indices de réfraction sont en concordance dans la majorité des cas avec les lois de variation des densités en fonction de la dilution. Le chlorure de sodium, par exemple, qui donne dans sa solution à la température ordinaire deux hydrates correspondant aux formules $NaCl + 30H^2O$ et $NaCl + 15H^2O$, a une courbe de densités qui permet, bien que d'une façon moins nette, de tirer les mêmes conclusions.

Ces faits sont en désaccord avec la théorie de la dissociation du sel au sein du dissolvant, si l'on admet que cette dissociation soit de même nature que celle considérée ordinairement en Chimie. En effet, même en supposant que l'ionisation du sel ne change pas la valeur de l'indice de réfraction, il est difficile de concevoir comment cette dissociation peut exister puisque l'expérience montre ce sel à l'état d'hydrate.

M. Dufet ne veut, en aucune façon, contester les intéressants résultats obtenus par M. Bary; mais l'existence des points singuliers signalés dans les courbes des indices des dissolutions étudiées paraît en contradiction avec les faits généralement admis; la question a une haute importance; elle touche à beaucoup d'autres, l'existence des molécules cristallines dans le sein des dissolutions, par exemple. M. Dufet croit devoir signaler quelques causes d'erreurs possibles : variations de température, dosages imparfaits, etc.

M. Wyrouboff s'associe à ces réserves; mais, d'autre part, il veut, du fait que M. Bary a signalé comme contraire à la théorie de la dissociation des ions, tirer une conséquence catégorique; cette théorie lui paraît dénuée

de tout fondement; comment peut-elle expliquer des faits comme la coloration bleue de la dissolution de sulfate de cuivre, quand le sulfate anhydre est absolument incolore? Les expériences que l'on cite à son appui ne comportent d'ailleurs que peu de précision : elles n'expliquent bien que des faits très mal connus, et négligent les autres.

M. de Kovalski fait remarquer que M. Otswald a expliqué dans la théorie de la dissociation des ions, les différences de colorations signalées; sans être partisan absolu de cette théorie, il en signale toute l'importance; un grand nombre de phénomènes sont ainsi groupés et rattachés à un même ensemble; aussi bien le nom de dissociation est impropre et entraîne peut-être quelques confusions : les ions mis en liberté ne sont pas des atomes ordinaires, doués qu'ils sont d'une énorme charge électrique.

M. Bouty ne méconnaît point l'importance de la théorie d'Arrhénius, mais aucun des faits invoqués à son appui ne lui paraît constituer une preuve formelle; on démontre qu'une propriété physique de la dissolution est une propriété additive et rien de plus; la théorie semble se résumer en un symbole plus ou moins utile. On se figure d'ailleurs difficilement comment dans une dissolution d'acide chlorhydrique, par exemple, existeraient du chlore et de l'hydrogène en liberté, alors même qu'ils seraient chargés d'électricité; cette dissolution ne se forme-t-elle pas en effet, à partir des éléments, chlore et hydrogène, par une suite de dégagements de chaleur tous positifs; à quoi correspondrait cette augmentation considérable d'énergie, quand on reviendrait ainsi à l'état initial?

Après quelques observations échangées entre MM. Abraham, Wyrouboff, de Kovalski, Bouty, Curie et Brunhes, la discussion est close.

M. Broca a étudié la sensibilité différencielle de l'œil, et en a tiré des conséquences de deux natures, les unes théoriques et les autres pratiques.

Les conséquences théoriques étant relatives à la loi psycho-physique, il est nécessaire de commencer par justifier celle-ci, que quelques personnes mettent en doute. Il faut définir l'état de l'œil pour être sûr qu'à une excitation déterminée correspond une sensation déterminée. L'état de l'œil dépend essentiellement de la série des sensations qu'il a reçues avant l'excitation actuelle. Mais, en vertu de son évolution continuelle sous l'action du sang, si l'on considère une excitation déterminée, la sensation tendra, au bout d'un temps suffisamment long, vers une limite déterminée. C'est cette limite qu'il faut faire entrer dans la loi psycho-physique.

La loi psycho-physique est basée sur l'étude de la sensibilité différencielle de l'œil et sur l'hypothèse de Fechner : L'accroissement de sensation minimum nécessaire pour différencier les perceptions est constant. Ceci est vérifiable expérimentalement. En effet, les sensations dues aux deux yeux s'ajoutent. Ceci est rationnel, étant donnée la demi-décussation des fibres issues du point de fixation. En effet, les deux yeux jouent le rôle de machines génératrices d'énergie nerveuses; les deux circonvolutions occi-

pitales jouent celui de machines réceptrices; la demi-décussation des fibres montre que chacune des machines génératrices distribue également son énergie entre les réceptrices. Cette distribution symétrique de l'énergie nerveuse issue d'un œil rend la sensation indépendante du rendement différent des deux hémisphères cérébraux.

Expérience qualitative. — Soit un écran tenu à bout de bras et cachant à un des yeux la moitié d'une surface blanche uniforme; elle est séparée en deux, l'une vue monoculairement, l'autre binoculairement : la première plage est plus sombre que l'autre. Cette différence dépend de celui des deux yeux auquel on cache la moitié du champ, car les deux yeux ne fonctionnent pas également bien. En observant un photomètre Rumford dont chaque plage n'est vue que par un seul œil, on peut mesurer le rapport des rendements des deux yeux, qui est souvent considérable, puisqu'il atteint et dépasse 2 chez quelques personnes.

On peut étudier la sensibilité différentielle avec chaque œil et avec les deux yeux par le disque rotatif à trait interrompu de Masson.

Appelons I l'éclairement du fond du disque, δI l'accroissement d'éclairement entre ce fond du disque et la couronne obscure de rayon r; il est aisé de voir que $\frac{\delta I}{I} = \frac{d}{2\pi r}$, d étant l'épaisseur du trait. L'expérience montre que si l'œil droit seul perçoit la couronne n, l'œil gauche la couronne p, les deux percevront la couronne $n+p$. On déduit facilement de ce résultat expérimental et de la formule précédente que δS, accroissement de sensation minimum nécessaire pour différencier les perceptions, est le même.

L'étude de la sensibilité différencielle binoculaire au moyen de ce même disque montre que $\frac{\delta I}{I}$ varie en fonction de I d'une manière très régulière en donnant une hyperbole presque équilatère, dont la tangente horizontale, qui correspond au maximum de sensibilité, correspond à l'éclairement de 1 carcel à $1^m,10$ environ.

Tous ces faits réunis prouvent que, pour faire de la photométrie, il faut autant que possible opérer binoculairement. Mais dans ce cas, vu l'irrégularité de la diffusion, le rôle des deux yeux n'est pas le même pour la perception de chacune des deux plages. Il est donc de toute nécessité d'observer soit avec une source auxiliaire fixe, soit par retournement. Si nous jugeons l'égalité entre deux plages, les deux lumières étant sur deux droites fixes, c'est que les éclairements sont liés par la relation $e = E(1+k)$, k dépendant de l'observateur de l'angle d'incidence et de la surface diffusive. Intervertissons les sources, alors $E = e'(1+k)$ au moment de l'égalité, d'où $ee' = E^2$. Si I est l'intensité de l'étalon, x_1, x_2 les distances de la source à mesurer et z son intensité, on a

$$z = \frac{I}{a^2} x_1 x_2.$$

Pour les instruments à oculaires, du type indiqué par M. Cornu, il y a avantage considérable à placer un fil de réticule non au point un peu en arrière de la plage observée, de manière à fixer parfaitement la position de l'œil observateur.

Études théoriques et expérimentales sur les sensations visuelles et la photométrie;

PAR M. ANDRÉ BROCA.

Dans leurs études photométriques, Bouguer d'abord, Masson ensuite furent frappés de ce fait, que l'œil percevait une différence entre deux plages lumineuses lorsque cette différence avait pris une certaine valeur, dépendant de l'intensité commune primitivement aux deux plages. C'est cette remarque expérimentale qui a été le point de départ des essais faits par Weber, puis par Fechner, pour trouver une relation entre la grandeur de la sensation visuelle et celle de l'excitation.

J'ai cherché à reprendre en détail cette étude, et ses résultats expérimentaux m'ont amené à quelques conséquences relatives à la pratique photométrique.

La loi de Fechner a commencé par être admise d'une manière tout à fait générale, mais un revirement semble se produire actuellement et beaucoup de personnes semblent croire à l'impossibilité de l'existence d'une fonction reliant la sensation et l'excitation. Il y a donc lieu de montrer l'existence d'une pareille fonction, avant de rien tenter pour en chercher la forme.

La rétine est une machine qui transforme l'énergie ondulatoire, lorsque sa longueur d'onde est comprise entre certaines limites, en une autre manifestation de l'énergie, de nature entièrement inconnue, et que les physiologistes appellent l'*influx nerveux*. Celui-ci se propage par un conducteur, le nerf optique, et vient impressionner l'écorce cérébrale dans une région nettement localisée : le lobe occipital. Est-il possible, au milieu de ces phénomènes complexes, de chercher une loi reliant la sensation à la cause objective? Certainement non si l'on ne définit pas absolument l'état des organes au moment de l'impression, car l'effet de celle-ci dépend évidemment de la fatigue des divers organes. Celle-ci dé-

pend elle-même de deux causes : les impressions antérieurement reçues, et l'état de la circulation, qui permet la reconstitution des organes.

Mais, à cause de l'évolution constante de l'organisme et de sa reconstitution au moyen des matériaux apportés par le sang, l'état des organes de la vision, sous l'action d'une excitation bien déterminée, tend vers une limite bien déterminée aussi. Nous pourrons donc définir la sensation et la sensibilité différentielle pour une excitation donnée : la valeur limite que prennent ces deux quantités lorsque l'intensité lumineuse considérée a agi pendant un temps suffisant.

L'existence de cette fonction étant admise, quelle est sa forme?

Fechner en a donné une première approximation en s'appuyant sur la loi de Bouguer-Masson, que je citerai plus loin, et sur l'hypothèse suivante : Quand l'œil distingue deux plages, c'est que l'accroissement de sensation dû à la différence d'éclairement a acquis une valeur constante.

La première chose à faire, c'est de vérifier l'hypothèse de Fechner, et c'est ce que j'ai fait en m'appuyant sur certaines données anatomiques et sur des expériences indiquant la part de chacun des deux yeux dans la vision binoculaire. Je vais démontrer que les sensations dues aux deux yeux s'ajoutent.

L'organe de la vision peut, en effet, être assimilé à une installation pour le transport d'énergie à distance. L'énergie ondulatoire met en action une machine génératrice, la rétine; celle-ci transmet à travers le nerf optique cette énergie de nature tout à fait inconnue que l'on appelle l'*influx nerveux*. Celui-ci est reçu par une portion bien déterminée du cerveau, qui fait l'effet de machine réceptrice et qui, sous l'action de cette énergie, donne lieu en dernière analyse à l'acte psychique de la perception. Il y a donc deux machines motrices et deux réceptrices. Les valeurs relatives de chacune d'elles ne peuvent pas être connues *a priori* et nous savons que, pour les lobes cérébraux, le fonctionnement ne doit pas être le même. Les deux machines réceptrices, qui produisent en dernière analyse la sensation ont donc probablement un rendement inégal; par conséquent, on ne peut conclure du fait de l'emploi des deux yeux à l'addition des sensations dues à chacun d'eux, qu'à une condition, c'est que l'influx nerveux produit par

chacun des deux yeux se divise également entre les deux réceptrices, c'est-à-dire les deux hémisphères cérébraux. C'est ce qui a lieu, en effet, pour les fibres issues du point de fixation de chaque œil, appelé *tache jaune* par les anatomistes; de nombreuses expériences prouvent que l'entrecroisement porte sur la moitié du faisceau qui en est issu, en un point appelé le *chiasma des nerfs optiques*. Nous pouvons donc dire que les sensations des deux yeux doivent s'ajouter.

Si l'œil droit utilise, par exemple, $\frac{1}{\alpha}$ de la quantité d'énergie lumineuse émise par unité de surface et si l'œil gauche seul en utilise $\frac{1}{\beta}$, les deux yeux fonctionnant ensemble en utiliseront $\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}\right)$; donc, si les sensations s'ajoutent, nous devrons avoir avec les deux yeux une sensation proportionnelle à $\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}\right)$ si elle était proportionnelle à $\frac{1}{\alpha}$ avec l'œil droit seul et à $\frac{1}{\beta}$ avec le gauche seul.

L'expérience directe vérifie ceci qualitativement; malheureusement les mesures sont impossibles, nous devons nous en tenir à l'évaluation subjective.

Regardons avec un seul œil une surface blanche uniformément et bien éclairée, et interposons un écran opaque tenu à bout de bras, de manière à en cacher une partie. De la sorte, l'écran étant assez écarté, on pourra considérer la surface comme divisée en deux plages uniformes, l'une claire et l'autre obscure, la zone pour laquelle l'écran empêche l'utilisation complète de la pupille étant très mince. Elle se confond d'ailleurs avec la zone estompée due à la diffraction. Si à ce moment on ouvre l'autre œil, on perçoit très nettement une très grande différence d'intensité entre la plage vue avec les deux yeux et celle qui est vue avec un seul œil. Cette observation est parfois délicate, car les observateurs qui ont un œil notablement moins bon que l'autre font en effet facilement abstraction de sa sensation.

J'ai fait des mesures relatives à cette différence au moyen du photomètre Rumford un peu modifié. Je place derrière le photomètre un écran présentant une échancrure pour le nez, et séparant l'une de l'autre les deux plages lumineuses. En plaçant le front et le nez contre la tranche postérieure de cet écran, l'œil gauche

seul voit la plage de gauche du photomètre, et l'œil droit seul celle de droite. Les plages éclairées se détachent sur un fond sombre.

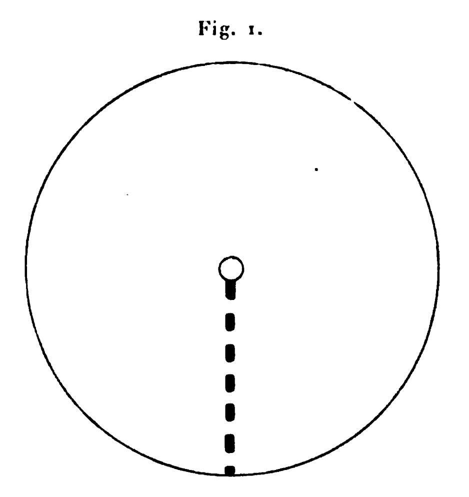
J'ai obtenu ainsi le résultat suivant. La plage de droite ayant un éclairement de 0,4 carcel-mètre, celle de gauche me présentait la même sensation pour un éclairement de 1 carcel-mètre. Donc, à égalité d'éclairement, mon œil gauche me donne une sensation à peu près deux fois et demie plus faible que mon œil droit. Cette grande différence tient à des conditions spéciales à mes yeux, et n'existe pas en général au même degré, quoique de grandes différences soient très fréquentes.

Ces expériences me semblent établir le fait que j'ai énoncé, c'est-à-dire que les sensations dues aux deux yeux s'ajoutent. J'ai complété cette expérience par une autre, faite avec le disque rotatif à trait interrompu de Masson [1] : j'ai regardé un disque rotatif à

---

[1] Soit (*fig. 1*) un trait interrompu tracé à l'encre de Chine, et passant par le centre du disque. Quand on fait tourner le disque, chacun des éléments du trait engendre une couronne mince sombre, en vertu de la persistance des impressions

Fig. 1.



lumineuses sur la rétine. On peut calculer le rapport de l'intensité de chacune de ces couronnes à celle du fond blanc du disque. En supposant le trait d'un noir absolu, si I est l'intensité du blanc du disque, si r est le rayon moyen d'une couronne et d l'épaisseur du trait, l'intensité de la couronne engendrée par le trait est $I - \frac{d}{2\pi r}$, et $\frac{d}{2\pi r}$, qui est calculable, représente justement le rapport de la différence d'intensité entre deux couronnes voisines à l'intensité du jour.

trait interrompu, et j'ai noté les dernières couronnes visibles avec les deux yeux simultanément, puis avec chacun des deux séparément. Le mouvement du disque, dû à une petite dynamo, était très rapide et régulier. Le résultat est le suivant. Si avec l'œil droit je vois la couronne ayant pour numéro d'ordre n, et avec le gauche la couronne p, avec les deux yeux, je vois la couronne $n+p$, quelles que soient les valeurs de n et de p, qui sont variables avec l'éclairage. Les écarts sont toujours très petits et variables. Ce fait a été vérifié par deux autres observateurs exercés.

Interprétons ce résultat. Le raisonnement précédent pour l'intensité totale peut se répéter pour sa variation. Nous pouvons dire que l'œil droit utilise $\frac{1}{\alpha'}$ d'une variation d'énergie entre deux plages, l'œil gauche $\frac{1}{\beta'}$ et les deux $\frac{1}{\alpha'}+\frac{1}{\beta'}$.

Dans le cas de la vision monoculaire, une circonvolution occipitale est exactement dans la même situation vis-à-vis des excitations venues d'un quelconque des deux yeux. Nous pouvons donc dire, sans faire d'hypothèse, que la perception différentielle aura lieu quand la différence des sensations dues aux deux plages aura pris une valeur identique pour les deux yeux, puisque c'est, dans les deux cas, la même machine réceptrice qui fonctionne. Si donc δI, δI_1, δI_2 représentent les variations d'intensité par unité de surface des deux plages éclairées, perceptibles respectivement avec les deux yeux, avec le droit seul, et avec le gauche seul, nous aurons, en choisissant convenablement l'unité de sensation, qui est arbitraire,

(1) $$\delta S = \frac{\delta I_1}{\alpha'} = \frac{\delta I_2}{\beta'};$$

δS représente l'accroissement de sensation; avec les deux yeux nous avons

(2) $$\delta S' = \left(\frac{1}{\alpha'}+\frac{1}{\beta'}\right)\delta I.$$

Il est facile de se rendre compte, par la construction même du disque, que les variations δI correspondant à une couronne déterminée sont inversement proportionnelles à la distance de la couronne à l'axe de rotation. La loi susénoncée nous montre donc que

$$\frac{1}{\delta I_1}+\frac{1}{\delta I_2}=\frac{1}{\delta I};$$

donc la relation (2) peut s'écrire

$$\delta S' = \left(\frac{1}{\alpha'} + \frac{1}{\beta'}\right) \times \frac{1}{\frac{1}{\delta I_1} + \frac{1}{\delta I_2}}.$$

Or (1) peut s'écrire

$$\delta S = \frac{\frac{1}{\alpha'}}{\frac{1}{\delta I_1}} = \frac{\frac{1}{\beta'}}{\frac{1}{\delta I_2}} = \frac{\frac{1}{\alpha'} + \frac{1}{\beta'}}{\frac{1}{\delta I_1} + \frac{1}{\delta I_2}},$$

donc $\delta S' = \delta S$.

L'intensité de sensation lumineuse est évidemment plus grande avec les deux yeux qu'avec un seul, d'après l'expérience précédente, et nous voyons par l'expérience que l'augmentation de sensation qui amène la perception est la même dans les deux cas. Ces expériences donnent donc un appui sérieux à l'hypothèse de Fechner.

Il me reste à étudier la sensibilité différentielle de l'œil, en fonction de l'intensité, et à en déduire la loi qui relie la sensation à l'excitation.

Bouguer, en étudiant la précision de son photomètre, Masson, en employant le disque rotatif déjà décrit, avaient énoncé le fait suivant : le rapport de la plus petite différence perceptible à l'intensité totale est une constante.

Helmholtz avait déjà montré, mais sans mesures, que la sensibilité différentielle passait par un maximum. J'ai repris des expériences analogues, mais accompagnées de mesures photométriques. La source lumineuse était une lampe à gaz étalonnée et dont la valeur était constamment vérifiée au moyen d'un photomètre Mascart modifié comme je l'indique plus bas, et préalablement étalonné lui-même. L'éclairement du disque était ensuite calculé par la loi de l'inverse du carré des distances. La lampe à gaz valait à très peu près 1 carcel. Les résultats ont été les suivants :

Distance de la lampe.	Éclairage des disques.	Couronne perçue.	$\frac{\delta I}{I}$.
m	carcel-mètre		
1	1	7	$\frac{1}{173}$
2	$\frac{1}{4}$	6	$\frac{1}{147}$
3	$\frac{1}{9}$	4–5 douteux	$\frac{1}{94}$
4	$\frac{1}{16}$	3–4 »	$\frac{1}{72}$
5	$\frac{1}{25}$	2–3 »	$\frac{1}{44}$

Traduisant ces résultats par une courbe où les valeurs de I sont les abscisses et celles de $\frac{\delta I}{I}$ les ordonnées, j'ai obtenu une branche d'hyperbole ayant l'axe des y pour asymptote; ceci est évident, car, quand I tend vers o, δI tend vers le minimum perceptible qui n'est pas nul. La *fig.* 2 la montre.

La loi de Fechner $S = A \log I + S_0$ est impuissante à rendre compte des faits. En effet, pour les faibles intensités, la sensation tend vers o, au lieu que $\log I$ tend vers $-\infty$. Aucune valeur donnée à la constante d'intégration ne peut rendre compte d'un pareil écart. De plus, pour une certaine valeur de l'intensité, le rapport $\frac{\delta I}{I}$, qui correspond au minimum de différence perceptible δI, passe par un maximum, d'après les expériences d'Helmholtz, et les précédentes. Enfin, pour $I = \infty$ la sensation serait infinie, d'après la loi de Fechner, et c'est là une absurdité, car on ne peut concevoir une sensation infinie.

Je vais chercher à traduire en langage mathématique l'hypothèse de Fechner, vérifiée plus haut, en partant des résultats expérimentaux précédents.

Soit $S = f(I)$ la loi qui définit la sensation en fonction de l'intensité. Alors $dS = f'(I)\,dI$ tant que dI est assez petit. L'hypothèse de Fechner implique que, pour $\delta S = A$, l'œil distingue deux plages différant de δI; alors $A = f'(I)\,\delta I$, si l'on admet que δI est assez petit.

L'expérience montre que $\frac{\delta I}{I}$ passe par un minimum pour une certaine valeur de l'éclairement, et que δI tend vers une valeur finie quand I tend vers o. Il est aisé de voir que la forme la plus simple de δI qui rende compte de ce fait est $\delta I = BI^2 + CI + D$.

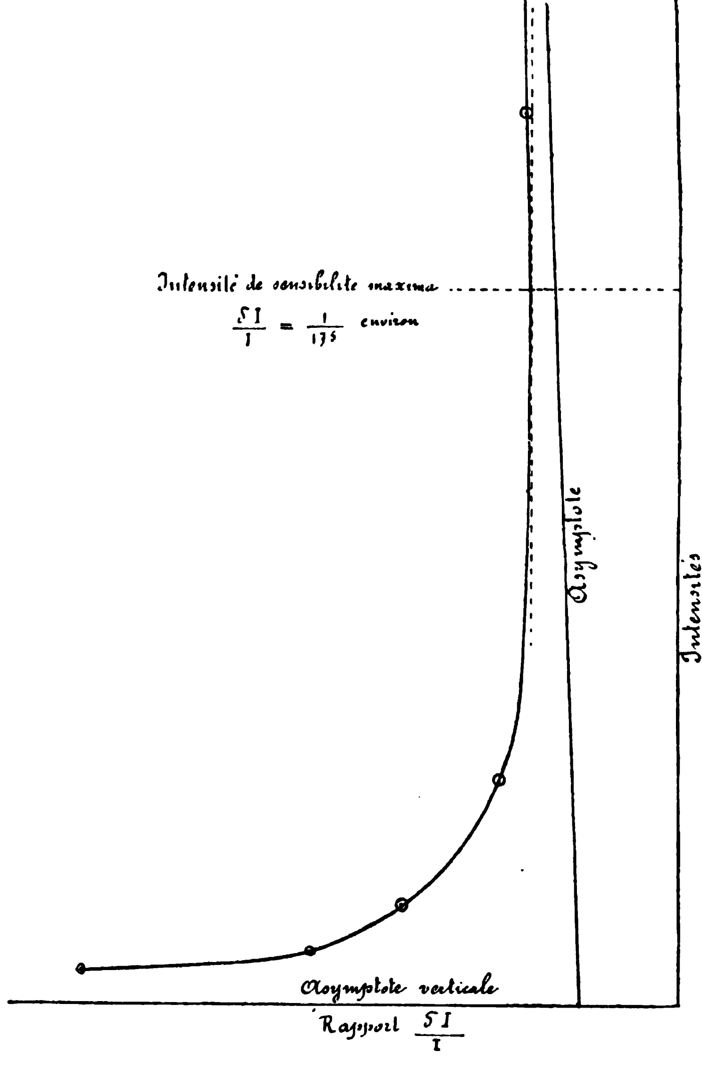
D'ailleurs $\frac{\delta I}{I} = \frac{BI^2 + CI + D}{I}$, et la connaissance de $\frac{\delta I}{I}$ pour un certain nombre de valeurs de I permettra de calculer B, C et D. Dans ces conditions nous aurons $f'(I) = \frac{BI^2 + CI + D}{I}$ et l'équation différentielle à résoudre sera

$$dS = \frac{A\,dI}{BI^2 + CI + D}.$$

D'ailleurs, il est évident que δI ne peut jamais s'annuler pour des

valeurs positives de I; donc on peut trouver deux formes de loi :

Fig. 2. — Courbe de la sensibilité en fonction de l'intensité pour l'éclairage dû à un bec de gaz.



1° Si le trinome a ses racines imaginaires,

$$S = \frac{A}{ac}\left(\text{arc tang}\,\frac{aI+b}{c} + C\right).$$

2° Si le trinome a ses racines négatives $-a$ et $-b$,

$$S = A \log \frac{I + a}{I + b} + S_0.$$

Pour des limites peu étendues, il est évident que l'on peut remplacer l'hyperbole $y = \frac{BI^2 + CI + D}{I}$ par sa tangente, et alors on trouvera pour S une fonction logarithmique sans dénominateur. Si l'on suppose que cette tangente est la tangente horizontale du minimum de $\frac{\delta I}{I}$, on retrouve alors la loi de Fechner, telle qu'il l'a énoncée.

Ces formes de loi rendent donc compte des faits dans tous leurs détails, au moins dans les limites d'intensité utilisables sans danger pour la rétine. Pour les intensités très grandes, elles sont certainement fausses, mais il n'y a pas à se préoccuper de ces intensités qui ne sont jamais utilisées. D'ailleurs les expériences précédentes montrent que, dans les limites d'éclairage utilisables, la loi est bien de la forme énoncée. Je vais en conclure la loi mathématique de variation de $\frac{\delta I}{I}$.

D'après le Tableau d'expériences précédent, $\frac{\delta I}{I}$ est lié à I par l'équation

$$-0{,}0125\, I^2 + 0{,}0333\, I \left(\frac{\delta I}{I}\right) - 0{,}43\, I = 1.$$

Cette hyperbole n'est pas tout à fait équilatère, mais elle n'en est pas loin. Sa deuxième asymptote est $y = 0{,}376x + 1{,}32$, et sa tangente horizontale existe pour $I = 9^{cm},62$, correspondant à une distance de la lampe à l'écran de $1^{m},12$. L'expérience montre que, vers ce point-là, la sensibilité varie extrêmement peu.

En me servant des autres points comme vérification, je trouve un résultat très satisfaisant. Donc nous aurons à intégrer une expression de la forme

$$dS = A \frac{dI}{0{,}125\, I^2 + 0{,}43\, I + 1},$$

ce qui donnera un logarithme de la forme que j'ai indiquée plus haut. Donc on aura pour la loi de la sensation due à une lampe à gaz $S = A \log \frac{I + 12{,}65}{I - 45} + S_0$.

Il est bien entendu que ceci s'applique à mes yeux et à la lu-

mière du gaz d'éclairage. Il y a des yeux plus sensibles que les miens, et d'autres beaucoup moins sensibles. C'est donc à chacun de déterminer sa courbe au moment du besoin, ce qui est possible, car le procédé est extrêmement simple.

J'ai trouvé, par une expérience, une fonction logarithmique; il est possible que, pour d'autres conditions, on trouve un arc tang.

La conclusion pratique de tout ceci est que, pour faire de bonnes comparaisons photométriques, il faut opérer avec une intensité voisine de 1 carcel-mètre, pour un observateur placé à environ 30^{cm} des plages observées.

Mais ce n'est pas là la seule conséquence qui résulte, au point de vue de la pratique photométrique, des expériences que je viens de décrire.

Tout photomètre comporte une surface diffusive divisée en deux plages, éclairées chacune par une seule des deux sources à comparer. L'ensemble de ces deux plages est observé par vision soit monoculaire, soit binoculaire, suivant les types d'instrument, mais une condition que l'on cherche toujours à réaliser est une symétrie parfaite des faisceaux lumineux par rapport à la normale à la surface diffuse.

La nécessité de cette symétrie de l'appareil est bien connue de ceux qui s'occupent de Photométrie. Les surfaces diffusives ne sont pas parfaites, en effet, et ne diffusent pas également la lumière dans toutes les directions. On ne pourrait donc rien conclure de l'égalité d'éclat de deux plages qui ne seraient pas éclairées sous la même incidence. Une expérience facile à faire montre ce fait. Soit obtenue l'égalité des deux plages pour une position déterminée de l'observateur. Pour peu que celui-ci déplace sa tête, l'égalité lui semblera disparaître : c'est de là que proviennent une grande partie des erreurs photométriques. On ne peut comparer deux mesures que quand elles ont été faites pour une même position des yeux derrière le photomètre.

Il y a donc, à mon avis, une pièce qui manque à tous les photomètres à vision binoculaire actuellement en usage, c'est une pièce destinée à fixer la tête de l'observateur.

Celle-ci n'est d'ailleurs pas difficile à improviser, avec un support quelconque, pour les photomètres ordinaires Foucault. Rumford, ou autres dérivés du même principe.

C'est pour obvier à cet inconvénient qu'on a presque abandonné les photomètres à vision binoculaire, pour employer les types à œilleton fixe.

Pour les photomètres du système indiqué par M. Cornu, un dispositif analogue est nécessaire. J'ai employé fréquemment un photomètre de ce système, du type de M. Mascart, grand modèle. J'ai commencé par avoir des erreurs énormes; puis je me suis aperçu que ces erreurs étaient diminuées quand je mettais tous mes soins à fixer la position de mon œil. J'ai alors placé un réticule un peu en arrière du point. En l'amenant soigneusement toujours à la même position par rapport à la séparation des deux plages, j'ai obtenu des résultats parfaitement concordants.

Enfin, on augmenterait, je crois, la sensibilité de ces appareils, d'après les expériences ci-dessus décrites, en leur ajoutant une double chambre claire permettant d'opérer par vision binoculaire, et d'utiliser ainsi notre machine visuelle dans les conditions de meilleur rendement.

Supposons maintenant un photomètre Foucault, à vision binoculaire, pour lequel les sources sont mobiles le long de deux droites fixes dont la bissectrice est normale à la surface diffusive. Soit la tête placée aussi symétriquement par rapport à cette droite. Il semble que l'appareil est symétrique. Matériellement, oui, physiquement non, car les deux yeux de l'observateur ont souvent des rendements fort inégaux, comme nous l'avons vu précédemment, et d'après l'inégale diffusion dans les diverses directions, l'œil gauche a le rôle principal pour la perception de la plage de droite, et inversement.

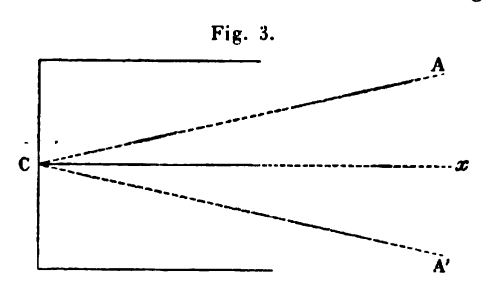
Si mon explication est exacte, la différence sera d'autant plus grande que l'angle AC sera plus grand. C'est ce que l'expérience vérifie. Avec un angle de 10° j'ai une erreur d'environ 30 pour 100, avec 20° j'ai 50 pour 100, environ.

Comment éliminer cette erreur systématique? Une première méthode est évidente : c'est d'opérer au moyen d'une source auxiliaire fixe, en A par exemple, et d'amener l'égalité des deux plages successivement avec l'étalon et avec la source à mesurer placées tous deux sur la ligne A'C.

Il est aussi une autre méthode, qui permet de se passer de la source auxiliaire.

Soit l'étalon en A, à une distance a de C. Amenons l'égalité apparente. Alors nous avons la relation $E = e(1 + k)$ entre les éclairements des deux plages; k est une constante dépendant de l'observateur, de la surface diffusive, et de l'angle ACx. Transportons l'étalon à une autre distance a' sur CA', et amenons l'égalité, la source à mesurer étant sur AC. Nous aurons l'égalité lorsque

Fig. 3.



$e' = E'(1 + k)$, E étant évidemment le même dans les deux cas.

Soient

Z l'intensité de la source à mesurer;
I celle de l'étalon;
x_1 et x_2 les distances de la source à mesurer à l'écran dans les deux expériences.

Alors

$$e = \frac{Z}{x_1^2}, \qquad e' = \frac{Z}{x_2^2}, \qquad E = \frac{I}{a^2}, \qquad E' = \frac{I}{a'^2};$$

éliminant $(1 + k)$, e, e', E, E' entre les six équations, il vient

$$EE' = ee', \qquad \frac{I}{a^2 a'^2} = \frac{Z^2}{x_1^2 x_2^2},$$

d'où

$$Z = \frac{I}{aa'} x_1 x_2.$$

En résumé, les conditions à remplir par un photomètre précis sont les suivantes :

1° Être disposé pour la vision binoculaire;

2° Être disposé pour fixer d'une façon bien nette la position des yeux observateurs;

3° Être disposé pour opérer par inversion des sources quand on ne peut opérer par double mesure.

Les deux premières conditions sont facilement réalisables dans les instruments sans oculaire; dans les instruments à oculaire, il suffit de placer parallèlement à la ligne de séparation des deux plages un réticule hors du point et de placer derrière l'oculaire une double chambre claire permettant la vision binoculaire.

SÉANCE DU 16 FÉVRIER 1894.

PRÉSIDENCE DE M. JOUBERT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 2 février est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. BERNARD, Professeur au Collège de Melun.
IMBAULT (G.), Professeur au Lycée de Tunis (Tunisie).
LAMOTTE, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Paris.

M. le SECRÉTAIRE GÉNÉRAL annonce qu'un généreux donateur qui veut garder l'anonyme vient d'offrir, magnifiquement reliée, la collection complète du *Journal de Physique*, fondé par d'Almeida. Ce cadeau est d'autant plus précieux que quelques-uns des premiers volumes de cette remarquable publication sont devenus extrêmement rares.

Du point d'application des forces électromagnétiques; par M. PELLAT. — Dans l'expérience classique de Foucault, où un disque de cuivre rouge tourne entre les mâchoires d'un électro-aimant, les forces électromagnétiques agissant sur les courants d'induction, développés dans le disque en mouvement, n'accomplissent aucun travail; on peut le voir par les considérations suivantes. Mettons le disque en mouvement à l'aide d'un travail W fourni, par exemple, par la chute d'un poids. Quand la force motrice aura cessé d'agir, le disque sera rapidement ramené à l'immobilité. Ramenons complètement le disque à l'état initial en lui enlevant la quantité de chaleur Q créée pendant l'expérience de façon que chacune de ses parties reprenne la température initiale. Le principe de l'équivalence appliqué au disque considéré comme un système fournit la relation

$$(1) \qquad T = EQ,$$

en appelant T le travail total mis en jeu. Or celui-ci se compose : 1° du travail W du poids moteur, 2° du travail x des forces électromagnétiques (forces extérieures aussi au système puisque nous ne considérons pas

l'électro-aimant comme faisant partie du système). On a donc

(2) $$W + x = EQ;$$

mais les expériences de M. Violle ont montré que la quantité de chaleur Q créée dans le disque est l'équivalent du travail W

(3) $$W = EQ.$$

De (2) et (3) on déduit $x = 0$: *le travail des forces électromagnétiques est nul.*

Si, comme on le fait habituellement, on admet que les forces électromagnétiques sont appliquées à la matière, ici le disque de cuivre, traversé par le courant, ce résultat paraît inexplicable; car la résultante de ces forces, comme on le sait, est dirigée de telle façon que, si son point d'application était déplacé pendant la rotation du disque, elle accomplirait un travail négatif. Ce point d'application n'est donc pas déplacé, ce n'est pas un point du disque en mouvement.

Toute difficulté disparaît, au contraire, si l'on admet que c'est le courant lui-même qui est le point d'application des forces électromagnétiques. On sait, en effet, d'après les expériences de Nobili, Antinori et Matteucci que ces courants sont fixes par rapport à l'électro-aimant : le point d'application des forces électromagnétiques ne se déplaçant pas, dans cette hypothèse, leur travail est nul. Pour concevoir alors comment la force vive du disque s'annule et est transformée en chaleur, il suffit d'admettre que les courants d'induction fixes dans l'espace exercent une sorte de frottement sur le disque en mouvement.

On a une image fidèle du phénomène dans l'expérience purement mécanique suivante : un disque D de cuivre a ses faces pressées par les deux branches d'une pince P traversées par l'axe de rotation, de façon que le disque ne puisse tourner, la pince restant fixe, qu'en exerçant un frottement. Considérons cet appareil comme un système DP, et communiquons à celui-ci un mouvement de rotation à l'aide d'une force extérieure accomplissant un travail W : la pince, si rien ne l'arrête, sera entraînée dans le mouvement de rotation du disque. Mais, si l'on approche un butoir B qui empêche la pince de tourner, sans que B touche au disque, celui-ci continuera son mouvement; mais sa force vive sera rapidement détruite et convertie en chaleur par le frottement. Pourtant, la force extérieure qui a agi, et qui est la résistance (pression) exercée par B sur P, n'accomplit aucun travail puisque son point d'application ne se déplace pas. Le principe de l'équivalence nous montrerait que la quantité de chaleur créée dans le système PD est l'équivalent du travail W qui a servi à mettre ce système en mouvement. On voit que la pince P est la représentation du courant d'induction de l'expérience de Foucault, et la pression exercée par le butoir B sur cette pince la représentation de la force électromagnétique.

L'expérience classique par laquelle on croit montrer que la force électromagnétique est appliquée à la matière, et qui consiste en une enveloppe

cylindrique en cuivre coiffant le pôle d'un aimant et tournant autour de son axe quand elle est traversée par un courant suivant ses génératrices, s'explique, en admettant que le courant est le point d'application de la force électromagnétique, par les frottements qu'exercent ces courants sur le cuivre; de même qu'une force appliquée à la pince P fera, par frottement, tourner le disque D auquel elle n'est pas appliquée directement.

M. Dufet communique à la Société les résultats de ses mesures personnelles sur les indices de réfraction du spath d'Islande et de la discussion des résultats antérieurs. Pour déterminer d'abord l'indice par la raie [$D_1 D_2$], il emploie exclusivement des prismes polis sur les trois faces et diaphragmés jusqu'à donner dans la lunette des images parfaites sans dépointement. On peut se passer de la mesure des angles, en mesurant les différences de déviation minimum, et en déduisant par un calcul plus ou moins facile suivant la valeur de ces différences les différences entre eux des trois angles réfringents. C'est la généralisation de la méthode employée par M. Macé de Lépinay. Les lectures se font avec un oculaire à fil micrométrique mobile donnant 3″ par division du tambour. Les mesures portant sur quatre prismes l'ont conduit à des nombres différant de moins d'une unité du cinquième ordre, et donnent pour valeur à 20° C. des indices principaux du spath

$$n_0 = 1{,}65837$$
$$n_e = 1{,}48645.$$

A l'aide du même oculaire à fil mobile, M. Dufet mesure les différences à l'indice pour la raie D des indices pour les raies de l'hydrogène, du lithium et du thallium. Les nombres expérimentaux sont *parfaitement* représentés par la formule de dispersion de Cauchy-Briot, en y introduisant les longueurs d'onde dans le milieu réfringent, comme l'ont proposé M. Mouton et M. Carvallo,

$$\frac{\lambda}{n^2} = A - Bl^{-2} - Cl^{-4} + Kl^2.$$

On peut dès lors calculer les indices pour les différentes raies du spectre, sans attribuer d'ailleurs à cette formule d'autre importance que celle de faire ressortir la loi de continuité. Les différences entre les résultats antérieurs et les nombres ainsi calculés ne montrent aucune marche systématique; on doit donc en conclure que la formule les représenterait également bien. La courbe moyenne des différences d'indice est une droite parallèle à l'axe des abscisses, dont l'ordonnée moyenne représente l'*erreur constante,* due à la détermination souvent erronée de l'angle réfringent, à la température, etc. Les différences entre l'ordonnée moyenne et les ordonnées de chaque raie donnent l'*erreur accidentelle.* Ces erreurs ne suivent aucune marche régulière. La moyenne des différences d'indice entre la raie $D_1 D_2$ et les raies spectrales coïncide assez bien avec les différences déduites de la formule calculée à l'aide des observations de l'au-

teur, pour qu'il n'y ait aucun avantage à chercher à calculer une autre formule.

M. le Dr D'ARSONVAL présente, au nom de M. BONETTI, constructeur-électricien, une nouvelle machine électrostatique, modification très pratique de celle de Wimshurst.

Le perfectionnement apporté à cette machine par M. Bonetti consiste à supprimer les secteurs métalliques et à mettre trois balais frotteurs à l'extrémité de chaque conducteur diamétral au lieu d'un seul. Dans ces conditions, le débit de la machine et son potentiel se trouvent augmentés. Si l'on prend en effet deux machines semblables, une avec secteurs, l'autre sans secteurs, on constate, à la bouteille électrométrique de Lane, que le débit de la machine sans secteurs est de 2 à 4 fois plus fort que celui de la machine ordinaire.

De plus, le renversement de polarité en marche n'est pas à craindre avec ce dispositif.

La machine ne s'amorce pas seule, mais c'est là un avantage qui permet de changer sa polarité en marche.

Pour l'amorcer en effet, quand elle est en mouvement, il suffit de placer le doigt à la partie supérieure d'un des plateaux. Si l'on veut renverser instantanément la polarité de la machine, il suffit de placer le doigt, au même endroit, sur le plateau opposé. Cette propriété offre un grand avantage en Électrothérapie, car elle permet de changer la polarité, en marche, sans avoir rien à changer dans les connexions reliant le malade à la machine.

On change le débit en supprimant un ou deux des trois balais frotteurs.

SÉANCE DU 2 MARS 1894.

PRÉSIDENCE DE M. JOUBERT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 16 février est lu et adopté.

A propos du Procès-verbal de la dernière séance, M. le SECRÉTAIRE GÉNÉRAL donne lecture de la lettre suivante adressée par MM. DUCRETET et LEJEUNE.

MONSIEUR LE SECRÉTAIRE GÉNÉRAL,

Dans le Tome X du *Journal de Physique* (1891), M. G. Pellissier donne une description intéressante de la machine de Wimshurst et il fait remarquer que cette machine électrique, munie de conducteurs diamétraux, peut être construite avec des plateaux unis sans secteurs métalliques; l'amorçage se fait alors avec une

source étrangère, le rôle des secteurs étant surtout de faciliter l'amorçage automatique et de rendre la machine auto-excitatrice.

L'idée de construire une machine de Wimshurst sans secteurs, que M. Truchot a suggérée à M. Bonnetti en 1893, était donc ainsi décrite bien antérieurement à cette date.

M. Bonetti s'attribue ce dispositif dans diverses présentations aux Sociétés savantes et les notes publiées. Il augmente le nombre de balais et il se réserve leur remplacement facultatif par des peignes.

Nous tenons à ajouter qu'en construisant les conducteurs diamétraux avec peignes et balais du genre de ceux employés dans les machines de Voss, nous obtenons de très bons effets avec les machines sans secteurs. Les peignes (mobiles sur eux-mêmes) peuvent être obliques; on peut ainsi les amener rapidement aussi près que possible des plateaux à rotation opposée. De larges balais imitant la forme des pinceaux de doreur peuvent être substitués à ceux ci-dessus.

En maintenant la disposition des plateaux des machines électriques de Voss, avec secteurs ou disques métalliques arrivant au contact des balais des conducteurs diamétraux (les conducteurs diamétraux disposés ainsi qu'il vient d'être dit), on assure l'auto-excitation de la machine et on agit sur un certain rayon des plateaux de la machine dans les parties électrisées non munies de secteurs: le débit est augmenté.

Dans les deux cas, des disques avec pointes et balais placés aux extrémités des conducteurs diamétraux, sur une certaine longueur, donnent de très bons résultats.

Les dispositifs peuvent donc varier à volonté.

Bertin, dans les *Annales de Chimie et de Physique*, Tome XXIII (1871), indique, d'après Poggendorff, les propriétés du conducteur diamétral, et il recommande d'employer, dans les machines à influence, des conducteurs de forts diamètres pour déterminer la déperdition et obtenir des étincelles en forme de zigzags.

E. Ducretet et L. Lejeune.

M. Hillairet fait observer que le raisonnement par lequel M. Pellat a, dans la dernière séance, voulu établir que les forces électromagnétiques sont appliquées au courant et non à la matière ne lui semble point exact. L'équation écrite par M. Pellat $w + x = Eq$, où w est le travail du poids moteur, x le travail des forces électromagnétiques, ne lui paraît pas correcte. On se trouve en présence d'un système où le travail moteur est égal au travail résistant et l'on a $w + x = 0$.

M. Vaschy démontre la même relation en partant des équations fondamentales de la Mécanique.

M. Pellat répond à M. Hillairet que l'on ne peut, dans l'application du principe de l'équivalence, assimiler l'effet du frottement à un travail. Il objecte à M. Vaschy que, dans le même ordre d'idées, on n'est point en droit d'appliquer le principe des forces vives lorsqu'il y a frottement.

M. Le Chatelier ne croit pas que l'on puisse parler du principe de l'équivalence, en isolant par la pensée un corps dans un système; il y a toujours au moins deux corps à considérer.

M. Abraham fait observer que, dans une publication récente, M. Duhem a précisé les conditions dans lesquelles on peut légitimement appliquer le principe : non seulement le corps considéré doit revenir à son état initial, mais encore pareillement tous les corps du système ; ou du moins il faut bien connaître les liaisons qui les rattachent au corps que l'on envisage en particulier.

M. Pellat partage entièrement cet avis ; il a toujours énoncé ainsi dans son enseignement le principe dans l'équivalence ; aussi bien dans la question actuelle, il s'agit de connaître les liaisons exactes du système.

M. Maumené soutient depuis 30 ans que la forme d'énergie appelée *affinité* est une hypothèse insoutenable ; il cite comme preuve les faits connus, entre autres :

La décomposition du borate de soude par l'acide sulfurique dans l'eau et l'action inverse de l'acide borique avec les sulfates de soude au rouge.

M. Maumené considère les actions chimiques comme dues à toutes les influences physiques *possibles dans les conditions de l'action*. Leur résultante est la seule cause du mouvement moléculaire où les poids atomiques produisent des composés.

La gravitation indépendante de la nature des atomes (équivalents est un mot à supprimer) détermine d'abord le mouvement à poids égaux ; et si l'un des corps, A ou B, est en excès, le premier composé AB_n s'unit avec un poids égal B_{2n}, ce qui donne AB_{3n}, etc.

Cette *Loi générale des mélanges* conduit à voir dans les composés, des quantités B_{xn} où x n'est pas nécessairement très simple, comme on le croit depuis un siècle et plus.

M. Maumené présentait depuis 1864 d'innombrables exemples de cette loi ; mais les différences des analyses paraissaient à ses confrères insuffisantes pour faire abandonner l'idée des nombres simples d'atomes, 1, 2, 3, etc. Ramené dans ces derniers temps à une étude nouvelle des Tetrafstates (tartrates), M. Maumené trouva dans un Mémoire déjà ancien (1839) de Dumas et Piria des preuves tellement frappantes de la vérité de sa Loi qu'elles avaient arraché aux deux illustres chimistes l'aveu :

« ... Peut-être doit-on voir dans ces faits une preuve que les formules chimiques ont été considérées comme trop simples jusqu'ici » (p. 392).

L'aveu est expliqué par M. Maumené.

La loi des mélanges conduit aux nombres trouvés par Dumas et Piria qui n'avaient pu, malgré tous leurs efforts, se rendre compte des « *anomalies* » prouvées par leurs analyses.

L'émétique de baryte contient pour un atome (équivalent) d'acide

1,185 de .... SbO^2
1,07 de .... BaO

Cette conséquence est générale.

M. D'ARSONVAL fait fonctionner devant la Société un moteur à pétrole construit par la maison PANHARD et LEVASSOR sur les données de M. Daimler. Ce moteur est caractérisé par une grande vitesse de rotation et une extrême légèreté. Sa construction est extrêmement simple et ne comporte que le nombre de pièces rigoureusement nécessaires pour le parcours du cycle à 4 temps. Tous les mouvements ont lieu à l'intérieur d'un bâti et on ne trouve à l'extérieur, comme partie mobile, que la poulie motrice.

M. d'Arsonval cite les nombreuses applications faites depuis 9 ans de ce moteur par MM. Panhard et Levassor, notamment à la traction des voitures sur route.

M. d'Arsonval montre que le moteur à pétrole, qui ne pèse que 50 à 60^{kg} par cheval, qui consomme 500^{gr} de pétrole qu'on trouve partout par cheval-heure, est le véritable moteur applicable à la traction sur route et que, sous ce rapport, il laisse bien loin derrière lui le moteur électrique actionné par des accumulateurs.

M. DE KOWALSKI entretient la Société de l'analogie entre l'état gazeux et l'état de dissolutions. Après avoir montré comment, en se servant de la méthode thermodynamique de M. Natanson, il est possible de déduire, au moyen des expériences sur le point d'ébullition, le point de congélation et les tensions des vapeurs des dissolutions, les opérations caractéristiques de ces dernières, il signale que l'analogie consiste en ceci :

Le potentiel thermodynamique φ du dissolvant varie de la même manière avec la concentration de la dissolution, que le potentiel correspondant d'un gaz dans un mélange de gaz avec la proportion des gaz mélangés.

M. de Kowalski étudie ensuite la variation de la fonction H_h correspondant au produit *pr* dans le cas des gaz. Les calculs effectués par un grand nombre d'expériences démontrent qu'en représentant graphiquement les résultats on obtient des courbes semblables à celles de M. Amagat pour les gaz. Ce résultat est indépendant de la théorie de la dissociation des ions. M. de Kowalski insiste enfin sur le fait que tous ces résultats ne sont que des conséquences du principe de l'unité des équations thermodynamiques.

SÉANCE DU 16 MARS 1894.

Présidence de M. Joubert.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 2 mars est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. Bonetti (L.), Constructeur électricien à Paris.
Moreau (Georges), Professeur au Lycée de Rennes.

M. Bonetti adresse une lettre à la Société en réponse à la lettre de MM. Ducretet et Lejeune insérée au dernier procès-verbal. Dans cette lettre, M. Bonetti revendique seulement d'avoir le premier *réalisé* la machine sans secteur et d'avoir eu le premier l'idée de multiplier les balais.

M. Pellat, en réfléchissant de nouveau à la question du travail des forces électro-magnétiques dans le disque de Foucault, a été amené à une conclusion inverse de celle qu'il avait indiquée dans l'avant-dernière séance. L'erreur provenait de l'oubli d'un terme dans l'application du principe de l'équivalence.

Considérons, en effet, un anneau Gramme immobile en circuit fermé et supposons que les aimants inducteurs tournent autour de lui; le fil de l'anneau est alors le siège de courants d'induction qui l'échauffe : il faudra retirer une quantité de chaleur Q pour ramener l'anneau à l'état initial. Si l'on prend l'anneau seul, comme un système, les forces électro-magnétiques n'accomplissant évidemment aucun travail dans ce cas; cette création de chaleur ne peut provenir que d'une communication d'énergie à l'anneau due au jeu des forces électromotrices, le produit d'une force électromotrice, par la quantité d'électricité qu'elle déplace, étant l'équivalent d'un travail, on peut appeler ce produit le *travail des forces électromotrices;* c'est un travail reçu par le système et, en le désignant par e, on a

$$e = EQ. \tag{1}$$

Il en est évidemment de même si l'anneau Gramme est remplacé par le disque de Foucault. Par conséquent, dans le cas où le disque est en mouvement, les aimants étant fixes, si l'on désigne par w le travail des poids moteurs, par x celui des forces électro-magnétiques, le principe de l'équivalence doit s'écrire

$$e + x + w = EQ. \tag{2}$$

En vertu de (1), il vient

$$x + w = 0 \qquad \text{ou} \qquad x = -w. \tag{3}$$

D'autre part, si l'on considère l'ensemble du disque et des aimants comme un système, le principe de l'équivalence donne

$$(4) \qquad w = EQ,$$

d'où, d'après (2),

$$(5) \qquad e + x = 0 \quad \text{ou} \quad e = -x$$

conformément à la théorie Thomson-Helmholtz. En somme, les quatre termes qui figurent dans la relation (2) sont égaux entre eux, en valeur absolue.

Puisque le travail des forces électro-magnétiques, dans le cas du disque tournant, n'est pas nul, tandis que les courants induits restent immobiles, *le point d'application des forces électro-magnétiques est la matière traversée par le courant* (et non le courant lui-même). C'est la démonstration d'un point toujours admis, mais, d'après l'expérience du cylindre de cuivre tournant autour du pôle d'un aimant, expérience peu probante, puisqu'elle est susceptible d'une autre interprétation.

Sur la pression intérieure dans les fluides et la forme de la fonction $\varphi(pvt) = 0$, par M. E.-H. Amagat. — M. Amagat s'est proposé de trouver, en s'appuyant sur des lois purement expérimentales, une expression du terme appelé *pression intérieure des fluides*. Il expose les considérations qui l'ont conduit à admettre, pour représenter cette pression, l'expression $\pi = \left(T\frac{dp}{dt} - p\right)$.

La valeur de π dépend sensiblement du volume seul; il est facile de montrer par des calculs très simples qu'il en est rigoureusement ainsi tant que la valeur du coefficient de pression $\frac{dp}{dt}$ est elle-même fonction du volume seul; or on sait que les variations de ce coefficient sous un volume donné sont toujours très petites et peuvent peut-être en grande partie être attribuées à des phénomènes accessoires.

Pour l'hydrogène, les valeurs de π, quand le volume diminue, croissent d'abord, passent par un maximum, s'annulent puis prennent des valeurs négatives rapidement croissantes; pour l'oxygène, l'azote et l'air, le volume sous lequel π devient nul n'est pas atteint à zéro sous une pression de 3000 atmosphères; pour l'acide carbonique et l'éthylène le maximum de π n'est pas encore atteint à zéro vers 1000 atmosphères.

Le coefficient $\frac{1}{p}\frac{dp}{dt}$, quand le volume diminue, croît et passe par un maximum; M. Amagat montre que ce coefficient doit reprendre, sous le volume pour lequel π s'annule, la valeur qu'il a sous de très faibles pressions alors que π est négligeable; c'est en effet ce qui a lieu pour l'hydrogène; pour ce dernier gaz π s'annule sous un volume égal à 0,00211.

M. Amagat examine ensuite la contradiction qui paraît résulter du fait

de la constance de π sous un volume donné et du résultat auquel l'avait conduit la méthode indiquée par lui pour reconnaître, au moyen des données expérimentales, si la pression intérieure est fonction, ou non, du volume seul; il montre que la contradiction tient à la forme $\varphi(pvt)=0$ généralement adoptée et se trouve ainsi conduit à modifier le terme représentant le covolume qui devient lui-même une fonction du volume.

Il arrive finalement à mettre la relation $\varphi(vpt)=0$ sous la forme

$$\left(p+\text{A}\,\frac{v-\varepsilon}{v^m}\right)\{v-[\alpha-\text{B}(v-\alpha)^n]\}=\text{RT},$$

dans laquelle on a pour l'hydrogène

$$\begin{array}{lll} \text{A}=0{,}000506, & m=3, & \varepsilon=0{,}002111, \\ \text{B}=0{,}0077, & n=\frac{1}{2}, & \alpha=0{,}0004. \end{array}$$

Un Tableau permettant de comparer les résultats expérimentaux avec ceux calculés au moyen de la formule qui précède, montre qu'entre 0° et 200° et jusque vers 3000 atmosphères, c'est-à-dire dans les limites des expériences, l'accord est aussi satisfaisant qu'on pouvait le désirer.

Enfin M. Amagat fait remarquer, en terminant, que si on fait le calcul de la pression interne $\left(\text{A}\,\frac{v-\varepsilon}{v^m}\right)$ pour un volume égal à l'unité, c'est-à-dire à zéro sous la pression d'une atmosphère, la valeur du travail intérieur correspondant concorde d'une façon satisfaisante avec le nombre résultant des expériences classiques de Lord Kelvin et Joule.

M. le Capitaine Colson expose la théorie d'un appareil qui permet de mesurer les durées de pose en photographie dite *instantanée*. Cet appareil consiste en un pendule se déplaçant devant une lame opaque dans laquelle sont pratiqués des crans dont la largeur est calculée de façon que chacun d'eux soit parcouru en un centième de seconde. Si l'on photographie cet ensemble, placé en avant d'un fond éclairé, le nombre et les fractions de crans occupés sur le cliché par la bande qui représente le déplacement du pendule ou du fil donnent le nombre et les fractions de centièmes de seconde pendant lesquels la surface sensible a été impressionnée. On obtient une largeur suffisante des crans, variant de 0 à un peu plus de 0,01 centimètre, au moyen du pendule qui bat la seconde pour une demi-amplitude $\alpha=20°$.

On calcule la longueur par la formule bien connue en fonction de $\sin\frac{\alpha}{2}$; on trouve $l=979^{\text{mm}}$. Il suffit de s'arrêter au terme en $\sin^4\frac{\alpha}{2}$.

La largeur ds de chaque cran est fournie par la formule de la vitesse, que l'on rend calculable par logarithmes en fonction de l'angle θ formé à chaque instant par le fil avec la verticale; on y fait $dt=\frac{1}{100}$. Les arcs, calculés ainsi avec une grande exactitude, ont été ramenés à un rayon

de 950^{mm}, de sorte que le fil puisse être amené très près de la lame. On peut donc mesurer : soit directement le déplacement du fil, soit le déplacement du centre de gravité du pendule en le réduisant dans le rapport de 98 à 95.

Comme la durée ainsi mesurée correspond aux deux bords opposés du mobile, il faut en retrancher le temps employé par celui-ci pour parcourir son diamètre, soit $\frac{e}{a}$, en appelant e ce diamètre et a la largeur du cran correspondant.

Cette correction n'est pas nécessaire pour le pendule si ses deux positions extrêmes se recouvrent en partie; le chemin parcouru peut alors être mesuré par la différence entre le diamètre du pendule et ce recouvrement, lequel, interceptant la lumière pendant toute la pose, se distingue très nettement.

Les erreurs résultant de la nature même de l'appareil portent sur la longueur du pendule, la position des crans, l'angle d'écart, les frottements, l'écartement du fil et de la lame. M. Colson montre que, dans les conditions ordinaires de la pratique, l'approximation peut être de $\frac{1}{50}$.

La lame est percée d'une fente qui indique le cran du milieu et de deux autres fentes qui marquent l'angle d'écart; le tout est supporté par un bâti léger dont la semelle est munie de trois vis calantes pour le réglage. L'appareil, construit par M. Fleury-Hermagis, figure dans le programme de l'exposition de Pâques, avec des spécimens obtenus.

Ce procédé a l'avantage d'être très simple et de permettre un contrôle continu; il sera utile à ceux qui construisent ou emploient les obturateurs d'usage courant en photographie instantanée, ainsi qu'à ceux qui se servent de poudres-éclairs; en particulier, il fournit la vitesse et la distance du pendule qui donnent, pour chaque ensemble objectif-obturateur, une image suffisamment nette du pendule, et on en déduit immédiatement une caractéristique essentielle de cet ensemble : le maximum de vitesse angulaire des objets qu'il peut photographier avec une netteté satisfaisante.

Sur la pression intérieure dans les fluides et la forme de la fonction $\varphi(pvt) = 0$;

Par M. E.-H. Amagat.

I. Je me suis proposé dans le présent travail de rechercher, séparément, et en m'appuyant uniquement sur les lois expérimentales, une expression du terme appelé *pression intérieure,*

dans les diverses formules proposées pour représenter la relation $\varphi(pvt) = 0$.

J'examinerai d'abord les lois que suit une expression que j'appellerai également *pression intérieure,* indépendamment de l'application qui peut en être faite aux formules en question, et que je commencerai par définir.

Lorsqu'une masse de gaz subit isothermiquement une variation de volume dv, le travail correspondant est $\mathrm{E}l\,dv$; soit

$$\mathrm{T}\frac{dp}{dt}\,dv.$$

Si l'on retranche le travail extérieur $p\,dv$, il reste, pour le travail intérieur,

$$\left(\mathrm{T}\frac{dp}{dt} - p\right)dv.$$

La pression extérieure étant le quotient du travail extérieur par la variation de volume, il paraît naturel d'appeler pression intérieure l'expression entre parenthèses qui est le quotient du travail intérieur par la variation de volume, et que je désignerai par la lettre π.

J'examinerai d'abord les lois que suit cette fonction quand on fait varier les conditions de volume, de pression et de température.

J'ai donné, dans de précédentes Communications, des Tableaux assez étendus des valeurs de $\frac{dp}{dt}$ pour différents gaz; c'est avec les nombres de ces Tableaux qu'ont été calculés ceux qui suivent.

Voici d'abord les résultats pour l'acide carbonique et l'éthylène.

$$\pi = \left(T\frac{dp}{dt} - p\right) \text{ jusqu'à } 1000^{\text{atm}}.$$

Acide carbonique.

Volumes.	0°-20°.	20°-40°.	40°-60°.	60°-80°.	80°-100°.	0°-100°.	100°-200°.
	atm	atm	atm	atm	atm	atm	atm
0,02385	23	23	20	20	23	22	18
0,01636		46	45	40	42	43	35
0,01300			66	63	63	64	55
0,01000			112	102	102	105	92
0,00768			176	162	166	168	146
0,00578			277	269	267	271	250
0,00428			444	449	456	450	435
0,00316			773	804	836	804	805
0,00250		1258	1335	1334	1370	1324	1323
0,00200	2292	2189	2346	2362	2081	2254	
0,00187	2583	2845	2416			2614	

Éthylène.

Volumes.	0°-20°.	20°-40°.	40°-60°.	60°-80°.	80°-100°.	0°-100°.	100°-200°.
	atm	atm	atm	atm	atm	atm	atm
0,01666	47	44	44	46	44	45	39
0,01125		95	91	90	85	91	80
0,00833		156	142	149	152	152	142
0,00643		239	241	244	243	242	234
0,00500		365	373	381	381	375	375
0,00417		533	561	548	579	555	539
0,00350	760	804	820	820	867	814	764
0,00300	1168	1127	1160	1138	1190	1154	
0,00286	1214	1327	1227	1285	1321	1348	
0,00							
0,00							

Ces valeurs de π ont été obtenues au moyen de celles de $\frac{dp}{dt}$, relatives aux limites de température indiquées, et correspondent aux volumes constants inscrits dans la première colonne verticale; l'unité de volume étant toujours celui de la masse de gaz à zéro, sous la pression de 1 atmosphère. Les vides du Tableau correspondent à l'état de saturation.

On voit que les nombres d'une même ligne horizontale varient peu.

Si l'on tient compte de ce qu'une très petite variation de la valeur de $\frac{dp}{dt}$ entraîne une variation considérable de la valeur de π,

on conclura que la pression intérieure est sensiblement fonction du volume seul, quoique la valeur moyenne entre 100° et 200° soit un peu inférieure à la valeur moyenne entre 0° et 100°, surtout pour les faibles pressions. Je dois du reste rappeler que les expériences à 200° ont présenté d'assez grandes difficultés, et que les erreurs possibles (et principalement pour les faibles pressions) sont toutes dans le sens d'une diminution de $\frac{dp}{dt}$, et, par suite, de π.

Il est facile, du reste, de voir que la constance de la valeur de π dépend de celle de la valeur de $\frac{dp}{dt}$ dont les variations, comme on le sait, sont très faibles. Si en effet $\frac{dp}{dt}$ était rigoureusement fonction du volume seul, on aurait pour un volume donné v

$$\frac{dp}{dt} = \varphi(v),$$

d'où

$$p = \varphi(v)\,T + C,$$
$$0 = \varphi(v)\,\theta + C,$$

et, par suite,

$$p = \varphi(v)(T - \theta),$$

θ ne dépendant que du volume seul; on aurait donc

$$T\frac{dp}{dt} - p = T\,\varphi(v) - (T - \theta)\,\varphi(v) = \theta\,\varphi(v) = \Phi(v).$$

La pression intérieure serait donc rigoureusement fonction du volume seul; voyons maintenant comment elle varie avec le volume.

Les Tableaux qui précèdent montrent que π augmente rapidement quand le volume décroît, dans les limites de pression qu'ils comportent, c'est-à-dire jusque vers 1000 atmosphères; je n'ai pu jusqu'à présent étudier l'acide carbonique et l'éthylène au delà de cette limite, mais j'ai fait cette étude pour l'oxygène, l'azote, l'air et l'hydrogène jusqu'à 4000 atmosphères. Voici un Tableau relatif à ces gaz qui va permettre de continuer l'examen des valeurs que prend π sous des volumes beaucoup plus petits.

$$\pi = \left(T \frac{dp}{dt} - p\right).$$

essions à zéro.	Oxygène.		Azote.		Air.		Hydrogène.		
	Volumes.	π.	Volumes.	π.	Volumes.	π.	Volumes.	π.	β (depuis 0°).
atm		atm		atm		atm		atm	
100	0,009265	34	0,009910	26	0,009730	26	0,010690	+ 1,5	9,00373
200	0,004570	135	0,005195	92	0,005050	99	0,005690	+ 9	0,00385
300	0,003208	260	0,003786	176	0,003658	190	0,004030	+ 14	0,00385
400	0,002629	383	0,003142	250	0,003036	299	0,003207	+ 16	0,00382
500	0,002312	401	0,002780	313	0,002680	339	0,002713	+ 15	0,00379
600	0,002115	589	0,002543	371	0,002450	397	0,002386	+ 12	0,00375
700	0,001979	671	0,002374	413	0,002288	434	0,002149	+ 3	0,00369
800	0,001879	745	0,002247	447	0,002168	459	0,001972	— 8	0,00364
900	9,001800	811	0,002149	470	0,002071	476	0,001832	— 33	0,00358
1000	0,001735	877	9,002068	488	0,001992	485	0,001720	— 46	0,00355
1200	0,001635	1000	0,001946	505	0,001883	489	0,001557	— 71	0,00346
1800	0,001526	1149	0,001813	513	0,001754	469	0,001380	—143	0,00333
1500	0,001448	1252	0,001714	507	0,001662	425	0,001258	—225	0,00322
2000	0,001408	1286	0,001663	494	0,001613	383	0,001194	—284	0,00315
2200	0,011375	1293	0,091620	479	0,001570	338	0,001141	—348	0,00310
2400	0,001329	1283	0,001583	458	0,001533	287	0,001097	—410	0,00305
2600	0,001316	1257	0,001553	436			0,001059	—495	0,00298
2800	0,001292	1222	0,001525	410			0,001024	—578	0,00290

Les résultats consignés dans ces Tableaux sont relatifs à des limites de température comprises entre zéro et 100° pour les pressions inférieures à 1000 atmosphères et entre zéro et 50° environ au delà de cette pression, ce qui importe peu d'après ce qui a été dit plus haut, relativement à l'influence de la température; ces résultats ne sont pas, comme ceux du premier Tableau, les produits bruts du calcul, ils ont été obtenus au moyen de valeurs de $\frac{dp}{dt}$ prises sur des courbes tracées de manière à faire disparaître quelques irrégularités inévitables dans des séries de valeurs correspondant à des différences secondes, et qui ont permis de raccorder les résultats obtenus par deux méthodes différentes qui présentaient une lacune $\left(\text{seulement pour les valeurs de } \frac{dp}{dt}\right)$ vers la limite commune.

On voit que, pour l'oxygène, les valeurs de π, quand le volume diminue, croissent, passent par un maximum, puis commencent à décroître d'une façon bien nette, quoique peu accentuée.

Pour l'azote et l'air, la décroissance après le maximum est très notable, surtout pour l'air.

Enfin, pour l'hydrogène, π continue à décroître après le maximum jusqu'à devenir nul, après quoi il prend des valeurs négatives rapidement croissantes. Le fait est certainement général; l'ensemble des résultats ne permet aucun doute à cet égard.

Pour les gaz simples étudiés (peut-être pour tous ceux formés sans condensation), le phénomène se produit dans des limites de pression d'autant moins élevées que le gaz est plus parfait; mais il ne faudrait tirer de là aucune conclusion relativement à ceux du premier Tableau qui n'appartiennent point au même groupe : il serait donc fort intéressant de pousser plus loin leur étude.

On remarquera combien, au point de vue qui nous occupe, l'hydrogène est, sous le rapport de la perfection, en avance sur tous les autres gaz, combien, en particulier, les valeurs positives de π sont relativement faibles. On peut chercher à s'expliquer le changement de signe de π, soit par un changement de signe des forces moléculaires, soit par la réaction des molécules comprimées les unes contre les autres, soit par les deux effets; je ferai remarquer à ce sujet que, au moment où π s'annule, le volume pour l'hydrogène (0,00211 environ) est encore bien supérieur à la limite inférieure du covolume répondant à la forme des isothermes; ce volume, caractéristique pour chaque gaz, doit évidemment entrer dans la relation $\varphi(pvt) = 0$.

Enfin, je ferai encore une remarque : au moment où π est nul, le coefficient $\left(\frac{1}{p}\frac{dp}{dt} = \beta\right)$, qui passe aussi par un maximum, reprend très sensiblement la valeur (0,00367) qu'il a sous la pression normale alors que π est extrêmement petit; cela devait être, et, en effet, on a alors

$$\pi = \mathrm{T}\frac{dp}{dt} - p = 0, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{dp}{p} = \frac{dt}{t},$$

et, par suite,

$$p = \mathrm{CT}, \qquad \text{au lieu de} \qquad p = \mathrm{C}(\mathrm{T} - \theta);$$

la pression est donc, comme dans les gaz parfaits, proportionnelle à la température comptée depuis le zéro absolu : on doit donc

retrouver pour β (partant ici de zéro) l'inverse de la température absolue.

II. Je me propose, maintenant, d'appliquer la fonction π dont j'ai précédemment étudié les lois à la relation $\varphi(pvt) = 0$, mise sous la forme généralement adoptée

$$(1)\qquad (p + \mathfrak{P})(v - a) = \mathrm{RT}.$$

Il convient d'examiner d'abord si, d'après sa définition, π peut comme $\mathfrak{P}$ représenter cet effet attribué à l'attraction réciproque des molécules, tendant à diminuer le volume comme le ferait une pression extérieure, de telle sorte que les choses se passent comme si, cette attraction n'existant pas, la pression extérieure était $(p + \mathfrak{P})$.

Or, π est le quotient du travail intérieur par dv, de même que p est le quotient par dv du travail extérieur, et il est facile de voir que le raisonnement établissant que le travail extérieur est $\mathrm{P}\,dv$ est en tout point applicable au travail intérieur, à la condition que ce travail soit exclusivement celui des forces à l'effet desquelles on peut substituer celui d'une pression extérieure, ici l'attraction réciproque des molécules. Cela revient à admettre qu'à température constante le travail interne de la molécule est nul, c'est-à-dire que l'énergie moléculaire varie seulement avec la température, ce qui paraît très vraisemblable tant que les distances des molécules sont relativement grandes; pour un volume suffisamment petit on conçoit que la réaction des molécules pressées les unes contre les autres quand on fait varier ce volume, puisse donner lieu, à température constante, à un travail intramoléculaire, mais on conçoit aussi que ce travail devient alors l'un des facteurs de la pression intérieure effective et rentre, par suite, dans la somme dont le quotient par dv donne la valeur de cette pression.

On a vu que la constance de la valeur de π sous un volume donné dépend de celle de $\frac{dp}{dt}$ sous ce même volume; la substitution de l'expression de π dans la relation (1) conduit en quelque sorte à la réciproque, pourvu que $(v - \alpha)$, même modifié, soit fonction du volume seul. On a, en effet,

$$\left(p + \mathrm{T}\frac{dp}{dt} - p\right)(x - \alpha) = \mathrm{RT},$$

d'où

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R}{v - a} = \Phi(v).$$

D'autre part, j'ai montré, dans un de mes précédents Mémoires, qu'en partant de la relation $\varphi(pvt) = 0$ sous la forme (1), on est conduit, pour satisfaire aux données expérimentales, à considérer $\mathfrak{P}$ comme fonction du volume et de la température, et cependant il résultait de ces mêmes données que $\frac{dp}{dt}$ était fonction du volume seul; il y a là une contradiction qui n'est en réalité qu'apparente et qu'il est facile d'expliquer.

Je remarquerai d'abord que la démonstration supposait connue la valeur de a, que j'avais déduite du coefficient angulaire de la partie des isothermes qui paraissait sensiblement rectiligne; mais j'ai montré depuis que, prolongées jusque sous des pressions beaucoup plus considérables, ces isothermes conservent une courbure peu prononcée, mais certaine; par suite, la valeur numérique de a n'est plus déterminée, il faut alors modifier le raisonnement; on peut le faire ainsi qu'il suit :

Soient v et v' les volumes occupés par le gaz à T° sous les pressions P et P', puis à T'° sous la pression P_1 et P'_1. Nous aurons, en appliquant la relation (1) aux deux températures et en supposant que $\mathfrak{P}$ soit fonction du volume seul,

$$\frac{(P + \mathfrak{P})(v - a)}{(P' + \mathfrak{P}')(v' - a)} = 1, \qquad \frac{(P_1 + \mathfrak{P})(v - a)}{(P'_1 + \mathfrak{P}')(v' - a)} = 1.$$

Ces relations peuvent être mises sous la forme

$$\frac{P(v - a)}{P'(v' - a)} = 1 + \frac{\mathfrak{P}'(v' - a) - \mathfrak{P}(v - a)}{P'(v' - a)},$$

$$\frac{P_1(v - a)}{P'_1((v' - a)} = 1 + \frac{\mathfrak{P}'(v' - a) - \mathfrak{P}(v - a)}{P'_1(v' - a)},$$

desquelles on tire, en éliminant $[\mathfrak{P}'(v' - a) - \mathfrak{P}(v - a)]$,

$$a = \frac{v'(P'_1 - P') - v(P_1 - P)}{P - P' + P'_1 - P_1}.$$

Cette formule doit évidemment donner pour a des valeurs indépendantes des volumes choisis pour faire le calcul au moyen des données expérimentales; or ce n'est pas ce qui a lieu; les valeurs de a diminuent avec les volumes choisis : elles varient du simple au double entre 100 et 1000 atmo-

sphères; par suite, l'hypothèse que $\mathfrak{L}$ est fonction du volume seul est inexacte, $\mathfrak{L}$ est aussi fonction de la température;

résultat en contradiction formelle avec ce qui précède.

Or, le résultat auquel nous venons d'arriver dépend essentiellement de la forme de fonction (1) que nous avons adoptée et que rien n'impose *a priori;* la contradiction peut donc parfaitement tenir à cette forme même; $\mathfrak{L}$ peut parfaitement n'être fonction que du volume seul, si, par exemple, a est aussi fonction de celui-ci; on est donc ainsi conduit à remplacer a par une fonction de v tendant vers une limite α au fur et à mesure que v tend lui-même vers cette limite. Il reste à déterminer les formes de cette fonction et de celle qui exprime la pression intérieure π.

La loi suivant laquelle π varie avec le volume conduit de suite à essayer la forme

$$\pi = A\frac{v-\varepsilon}{v^m},$$

ε étant le volume sous lequel π s'annule avant de changer de signe; j'ai déduit précédemment des données expérimentales la valeur de ε pour l'hydrogène: j'ai pu ensuite, par des calculs assez pénibles, déterminer les valeurs des coefficients A et m.

Les valeurs de π sont bien représentées dans toute la série des volumes en prenant

$$A = 0{,}000\,506, \qquad m = 3, \qquad \varepsilon = 0{,}002111.$$

Pour trouver l'expression de a, je remarquerai que la relation (1) devient, en y substituant $\left(T\frac{dp}{dt}-p\right)$ à la place de π,

$$\left(p + T\frac{dp}{dt} - p\right)(v-a) = RT, \qquad \text{soit} \qquad \frac{dp}{dt}(v-\alpha) = R,$$

R étant une constante (0,00367); on pourra, au moyen du Tableau des valeurs de $\frac{dp}{dt}$, calculer celles de a pour toute la série des volumes.

On arrive à bien représenter l'ensemble des valeurs de a ainsi calculées, au moyen de l'expression

$$a_v = \alpha + B(v-\alpha)^n.$$

Le calcul m'a conduit à

$$B = 0{,}0077, \qquad n = \tfrac{1}{2}, \qquad \alpha = 0{,}0004.$$

On arrive donc, en résumé, à la relation

$$\left(p + A\,\frac{v - \varepsilon}{v^m}\right)\left\{v - [\alpha - B(v - \alpha)^n]\right\} = RT.$$

Avec $m = 3$ et $n = \frac{1}{2}$ pour l'hydrogène; il reste à savoir si avec les autres gaz, pour lesquels la valeur de ε n'est point connue expérimentalement, on pourra représenter aussi facilement les valeurs de π et de a_v.

Voici maintenant un Tableau calculé pour l'hydrogène au moyen des coefficients qui précèdent; il donne aux différentes températures pour la série des volumes occupés par le gaz à zéro sous des pressions croissant de 100 atmosphères en 100 atmosphères, les pressions calculées par la formule et celles qui ont été fournies par l'expérience.

A zéro.				47°,3.		99°,25.		200°.	
Expérience.	Formule.	Expérience.	Formule.	Expérience.	Formule.	Expérience.	Formule.	Expérience.	Formule.
atm	atm	atm	atm	atm	atm	atm	atm	atm	atm
100	101,5	1200	1191	1164	1171	137	139,5	174	179
200	201,5	1400	1393	1273	1276	276	278,5	351	357
300	301	1600	1596	1390	1393	414	415	528	53[illegible]
400	400	1800	1798	1505	1506	551	551	700	70[illegible]
500	500	2000	2003	1737	1739	688	686	874	87[illegible]
600	599	2200	2212	1960	1968	824	820	»	»
700	699	2400	2409	2184	2199	960	953	»	»
800	799	2600	2613	2418	2435	»	»	»	»
900	809	2800	2825	2642	2667	»	»	»	»
1000	998	»	»	2858	2890	»	»	»	»

Le plus grand écart relatif a lieu pour chaque température sous la pression la plus faible; c'est ce qui arrive assez souvent pour le premier point d'une courbe, là où une légère erreur ne peut être rectifiée facilement par la direction de l'ensemble des points; on voit, du reste, que l'accord est aussi satisfaisant pour les pressions les plus élevées que pour les pressions inférieures.

Enfin je terminerai en signalant une coïncidence intéressante. Si l'on calcule, au moyen des coefficients adoptés, la pression in-

térieure pour un volume égal à l'unité, celui du gaz à zéro et sous la pression normale, on trouve $0^{atm},000\,875$; le travail intérieur serait donc les $\frac{875}{1000000}$ du travail extérieur, pour une variation isothermique de volume. Les expériences classiques de Lord Kelvin et Joule donnent $\frac{1}{1250}$, soit $\frac{800}{1000000}$; pour une question aussi délicate, l'accord peut être considéré comme satisfaisant.

SÉANCE ANNUELLE.

RÉUNIONS DES MARDI 27 ET MERCREDI 28 MARS 1894
à 8 heures très précises du soir.

Éclairage électrique du grand escalier et des salles d'exposition, par la .... **Société Cance.**

Éclairage de la porte d'entrée et du vestibule par la Société des globes holophanes système .... **Psaroudaki** et **Blondel.**

Voltmètres multicellulaires électro-statiques apériodiques de Lord **Kelvin.** — Ampèremètres apériodiques de Lord **Kelvin.** M. **Aylmer.**

Four à récupération .... M. **Bigot.**

Pompe à mercure nouveau modèle — Comparateur d'odeurs de M. **Mesnard** .... M. **Berlemont.**

Nouvelle machine électro-statique à cylindres. — Machine sans secteur à plateaux d'ébonite. — Machine sans secteur à plateaux de verre. — Machine avec ozoneur .... M. **Bonetti.**

Étuves à stérilisation portatives .... M. **Brenot.**

Photomètre binoculaire .... M. **A. Broca.**

Cahier des dessins bleus des voyages électriques et des systèmes employés par la Cie **des Tramways nord.** Dessins bleus de la nouvelle machine **Serpollet** .... M. **G. Broca.**

Dynamo universelle courant continu, alternatif et polyphasé. — Dynamo bicycle ou à pédale. — Moteur à pétrole de $\frac{1}{4}$ de cheval. — Moteur électrique de $\frac{1}{12}$. — Moteur à eau de $0^{kgm},25$. — Appareils divers .... M. **H. Cadiot.**

Electromètre de M. **Lippmann** avec modifications de M. **Limb.** Cet appareil muni d'un cône de projection permet la lecture de l'instrument à l'œil nu. — Appareils en diélectrine de M. **Hurmuzescu** : Electrophores. — Electroscopes. —

Bouteilles de Leyde. — Supports pour accumulateurs. — Coupe-circuit. — Appareil à distillation fractionnée de M. **Otto**. — Appareil à distillation fractionnée de M. **Varenne**. — Thermomètres à maxima et à minima de M. **Villard**. — Manomètre métastatique de M. **Villard**. — Thermomètres à toluène pour basses températures jusqu'à —100°. — Hygromètre de M. **Bichat**, permettant de prendre directement la température de la surface refroidie, surface constituée par du mercure. — Nouveau modèle de trompe double à canalisation, tout en verre .... M. **Chabaud**.

Condensateurs en mica argenté de M. **Bouty**. — Potentiomètre de M. **Pellat** pour la méthode Bouty-Pellat. — Clefs de décharge, modèle **J. Carpentier**. — Wattmètre portatif. — Ohmmètre pour la vérification des isolements. — Wattmètre à miroir. — Résistances à grande surface de refroidissement. — Grand modèle de boîte de résistances avec pont de Wheatstone. — Appareil d'**Hopkinson** pour l'étude des propriétés magnétiques du fer. — Lignes artificielles. — Photo-jumelle à répétition, nouveau modèle format $6,5 \times 9$. — Châssis amplificateur pour agrandissements en formats divers des clichés de la photo jumelle. — Focomètre **J. Carpentier** pour la détermination des distances focales des objectifs photographiques. — Focograde pour la détermination du volume focal des objectifs photographiques. — Explorateur optique pour l'étude générale des qualités des objectifs photographiques. — Appareil du général **Sebert** pour la détermination de la rapidité des plaques photographiques. — Châssis à circulation permettant de faire passer automatiquement dans un appareil de projection une série de photographies sur verre. — Projections, avec le châssis a circulation, des clichés obtenus par la photo-jumelle.. .... **J. Carpentier**.

Cinégraphe, appareil pour démontrer la composition des mouvements ou vitesses et pour tracer des couches d'un mouvement continu.................................. ..... M. **Clementich de Engelmeyer**.

Pendule gradué pour la mesure des durées de pose en photographie... M. le cap. **Colson**.

Nouveau compteur d'énergie électrique.................... M. **J. Déjardin**.

Appareil de MM. **Meslans** et **Frère** pour prendre la densité des gaz. — Pyromètre actinométrique de M. **Latarche**. — Automultiplicateur **Eggis**. — Homéotrope de M. **Gossart** pour les analyses des alcools et des essences. — Tableau des falsifications des essences qui peuvent être découvertes par ce procédé.................................. .... M. **Démichel**.

Actinomètre électro-chimique de MM. **Maréchal** et **Rigollot**. — Appareil pour la détermination de M et H (méthode de

Gauss). — Compteur d'intensité électrique de M. **Grassot**. —Galvanomètre enregistreur à aiguille libre de **E. D.** et **L. L.** pour les observations actinométriques, pyrométriques, courants telluriques et divers. — Appareil portatif pour la mesure rapide de l'isolement des conducteurs, permettant de mesurer jusqu'à 80 mégohms de résistance d'isolement. — Galvanomètre sensible, portatif. — Appareil de M. le colonel **Manceron**, pour la vérification rapide de l'âme des canons, avec sa machine magnéto-électrique portative. — Creuset électrique de laboratoire, moyen modèle, intérieur visible. — Transformateur électrique avec inducteur mobile pour les courants à haute tension et à grande fréquence, pouvant servir avec les courants alternatifs à 110 volts des stations centrales. — Machine magnéto-électrique pour expériences de cours avec les courants alternatifs. — Dynamo pour expériences de cours, donnant des courants continus et triphasés. — Commutateur rotatif transformant les courants continus en courants triphasés, avec moteur électrique à champ tournant. — Appareil de M. **de Kowalski** pour l'étude des décharges électriques dans divers gaz, sous diverses pressions et dans le vide. — Ponts de Wheatstone de M. **de Kowalski** pour la mesure des courants de haute tension et de grande fréquence. — Machine de Wimshurst. — Nouveau *replenisher* pour batterie électrique de M. **Pellat**. — Appareil de M. **James Chappuis**, pour l'étude de la variation des indices de réfraction des gaz liquéfiés et de leur vapeur saturante. — Stérilisateurs à froid de M. le Dr **J. Janet**, avec le liquide Pictet (CO^4S). — Photothéodolite de M. le colonel **Laussedat**............................ MM. **E. Ducretet** et **L. Lejeune**.

Théodolite photographique pour la mesure de la hauteur des nuages, construit sur les indications de MM. **Teisserenc de Bort** et **Raymond**.................................. M. **Echassoux**.

ppareil à épuisement continu.............................. M. **Etaix**.

Mesureurs portatifs de résistance à miroir. — Ohmmètre de M. **Mergier**... M. **Gaiffe**.

Expérience sur la vision des objets opaques au moyen des rayons diffractés.. M. **Gouy**.

Spécimens de photographies du fond de l'œil.............. M. **Th. Guilloz**.

Ophtalmomètre **Javal**, modèle 1894, destiné à mesurer les rayons de courbure des cornées en des points quelconques de l'œil. — Appareil de cours pour la projection des cristaux en lumière parallèle ou convergente et de tous phénomènes de polarisation rectiligne, elliptique, chromatique, rotatoire, avec une disposition spéciale pour montrer

la variation de position des axes dans les cristaux chauffés, le gypse par exemple.................................. M. **A. Jobin.**

Expériences sur le chauffage électrique des métaux........ M. **Ed. Julien.**

Four à gaz pour fusions et réactions à haute température, avec récupérateur. — Stérilisateur à pansements et instruments de Chirurgie et de Physiologie. Chaleur sèche.— Deux thermo-régulateurs. — Cadran solaire grand modèle.......... M. **P. Lequeux.**

Petit chemin de fer électrique de démonstration. — Exemple de transmission d'énergie.............................. M. **Limb.**

Photographies des couleurs obtenues par le procédé de M. **Lippmann**.. MM. **Lumière.**

Spectroscopes. — Hématospectroscopes du D[r] **Hénocque**. — Ophtalmomètre **Leroy** et **Dubois**. — Appareils d'optique.. M. **Lutz.**

Appareil chronophotographique. — Applications diverses. — Appareil pour la photographie microscopique et celle des petits objets.. M. **Marey.**

Franges d'interférences achromatiques et constitution des ondes paragéniques...................................... M. **G. Meslin.**

Nouvel appareil de photochronographie destiné aux études médicales et physiologiques de M. **A. Londe**. — Projections d'épreuves obtenues avec cet appareil. — Pragmatoscope ou appareil pour la projection des corps opaques placés dans le plan horizontal de M. le D[r] **Régnard**. — Projection des épreuves médaillées au concours des positifs de la Société de Photographie : 1° collection de M. **Demachy**, 2° collection de M. **Rouchonnat**.......................... M. **Molteni.**

Moteur à pétrole système Daimler.......................... MM. **Panhard** et **Levassor.**

Appareil inscripteur de la marche des trains et système de signaux destinés à éviter les collisions.................... M. **Pellat.**

Grand héliostat **Silbermann** avec miroir de $18^{cm} \times 36^{cm}$. — Microphotomètre de M. **Cornu**. — Appareil à franges de M. **Mascart**. — Biprisme lenticulaire de M. **Meslin**. — Appareil à franges semi-circulaires de M. **Meslin**. — Appareil de M. **Joubin** pour montrer successivement les anneaux de Newton à centre blanc et à centre noir. — Réfractomètre de M. **Ch. Fery**. — Appareil de M. **Berget** pour la persis-

tance des impressions lumineuses. — Projection des photographies de M. **Mach** fils : onde aérienne produite par une balle de fusil. Onde sonore produite par une étincelle électrique. Onde produite par un jet d'air. Projection de l'électroscope de M. **Hurmuzescu**. — Expériences diverses. M. **Ph. Pellin.**

Pyromarqueurs et pyrosoudeurs, nouveaux outils pour souder et marquer au feu. — Nouvelle soufflerie à pied pour laboratoire.. M. **M. Périer.**

Nouvel accumulateur.................................... M. **Peyrusson.**

Photomètre Foucault muni d'un dispositif spécial permettant de le transformer en photomètre à contraste. — Densimètre à cadran avec correction automatique de la température destiné spécialement aux usages industriels........ MM. **A. Pillon** et **J. Velter.**

Photographies de nuages élevés (cirrus et cirro-cumulus)... M. **G. Raymond.**

Météorographe commandé par M. **Janssen** pour l'Observatoire du mont Blanc. — Anémoscope électrique (girouette), enregistreur, 128 directions à un seul fil. — Statoscope en verre pour projections, destiné aux cours du Conservatoire des Arts et Métiers. — Sonde marine de M. **Favé**, pour déterminer le relief du fond de la mer. — Dynamomètre de traction de 30 tonnes, pour la vérification des machines à essayer les métaux. — Cinémographe instantané, indiquant les moindres variations de vitesse des machines (ralentissement au point mort). — Compteurs d'alcool **Bedout**. — Un à poids variable et à volume constant. — Un à poids constant et à volume variable. — Nouveau Tableau indicateur électrique à contact d'alarme pour le chauffage. — Ampèremètre enregistreur d'alarme à grande marche. — Voltmètre enregistreur à grande marche. — Voltmètre de poche équilibré à aimant armé pour l'essai des piles et des accumulateurs.. M. **Jules Richard.**

Nouveau verre pour ustensiles de Chimie dit *verre d'Iéna* résistant aux changements brusques de température et aux actions chimiques. — Zinc pour piles fabriqué en zinc chimiquement pur.. M. **P. Rousseau.**

Banc d'Optique pour l'étude de la vision............... M. **A. Sandoz.**

Globes holophanes (système **Psaroudaki** et **Blondel**)....... **Société des globes holophanes.**

Turbine à vapeur **de Laval**, construite par la maison Bréguet. M. **Sosnowski.**

Appareil dit *Tourniquet* de M. le commandant **Moëssard**, pour l'essai des objectifs photographiques, M. J. Carpentier, constructeur. — Appareil de M. le capitaine **Houdaille**, pour l'essai des objectifs photographiques. — Appareils construits d'après les indications de M. le général **Sebert**, pour l'essai des obturateurs photographiques, M. J. Carpentier, constructeur. — Appareil construit d'après les indications de M. le général **Sebert**, pour l'essai de la sensibilité des préparations photographiques, M. Fauvel constructeur. — Photomètre de M. **Mascart**, adapté par M. le général **Sebert** aux usages photographiques, M. Pellin constructeur. — Collection des instruments de vérification permettant de contrôler si les appareils photographiques sont construits conformément aux décisions prises par le Congrès international de Photographie. Etalons des vis de pied et des montures d'objectifs. — Jauges pour les planchettes de chambres noires, etc., M. Bariquand constructeur. **Société française de Photographie.**

Monochromatoscope, appareil destiné à l'étude de la couleur propre des corps et permettant d'observer les substances pulvérulentes ou pulvérisées dans une couleur simple déterminée. — Tube pour l'électrolyse des gaz............ **M. M. de Thierry.**

Nouveaux appareils portatifs à courant constant et continu. — Dynamomètre médical. — Commutateurs rhéostatiques Trouvé. — Appareil pour l'examen de l'âme des canons même de 15^{m}. — Appareils divers........................ **M. Trouvé.**

Appareil pour montrer le jeu des geysers................. **M. Violle.**

Arc étalon à crayons horizontaux de M. **Blondel**. — Tableau de cristaux pour la polarisation chromatique. — Tableau des différents types de roches pour l'étude au microscope et la projection. — Spectroscope à deux prismes pour la photographie des nébuleuses appartenant à l'Observatoire d'Alger. — Cube et prisme en quartz à faces rigoureusement planes et parallèles de M. **Macé de Lépinay**. — Meules en corindon durci, obtenues par électrolyse, pour l'usure des corps très durs, sept fois plus résistantes que les meules d'émeri.. **M. Werlein.**

Compteur d'énergie électrique système **Meylan** et **Rechniewski** (nouveau modèle)............................ **M. Wuilleumier.**

RÉUNION DU 28 MARS 1894.

Sur le rendement de l'œil et les conditions de meilleure distinction de deux plages colorées;

PAR M. ANDRÉ BROCA.

Lorsqu'une quelconque des manifestations de l'énergie vient exciter un point de notre appareil nerveux visuel, nous éprouvons la sensation de lumière. Un choc, la fermeture ou la rupture d'un courant électrique donnent cette sensation, mais il est des points de cet appareil, plus délicatement organisés que les autres, qui sont sensibles même aux quantités infiniment petites d'énergie mises en jeu dans les vibrations lumineuses. Ces points, ce sont les rétines.

Nous pouvons donc considérer une rétine comme une machine organisée spécialement pour transformer l'énergie lumineuse en une autre forme inconnue, qui, en dernière analyse, finit par produire la sensation. Je ne veux pas reprendre aujourd'hui l'étude de la fonction qui relie la grandeur de la sensation à celle de l'excitation, question que j'ai eu l'honneur, il y a quelque temps, d'aborder devant la Société. Je veux m'en tenir à un problème plus pratique, celui de la façon dont l'œil perçoit une différence entre deux plages. Tant que l'on opère en lumière homogène, la définition du problème ne souffre aucune difficulté, tout le monde conçoit *a priori* ce que c'est qu'une différence d'intensité. Quand, entre deux plages, il y a une variation portant à la fois sur la couleur et l'intensité, la définition du problème est beaucoup moins simple. La différence entre les deux plages dépend, en effet, de la façon dont varie séparément chacune des couleurs qui composent leur teinte, et la sensibilité totale de l'œil dépend de ses sensibilités spéciales pour chacune de ces variations. Or, la différentiation de deux plages en lumière simple se produit lorsque la différence des sensations dues à ces deux plages a pris une valeur déterminée, et cette perception a lieu pour des différences d'énergie variables avec la couleur; c'est-à-dire que le rendement de l'œil, considéré comme machine à percevoir des différences, varie suivant les couleurs excitatrices.

Définir le plus simplement possible toutes les façons dont peut varier la différence entre deux plages éclairées, étudier la façon dont peut varier le rendement de l'œil pour les différences que je vais définir, tels sont les deux points que je veux étudier aujourd'hui.

L'étude du premier point ne sera qu'une généralisation des travaux de Newton et de Maxwell sur la composition des couleurs; la deuxième étude s'appuiera sur les faits élémentaires de la fatigue de l'œil, sur les phénomènes qui se passent dans cet organe sous l'action de la lumière, et sur les phénomènes connus sous le nom d'*images accidentelles*.

Je ne veux pas entrer ici dans des détails sur le cercle chromatique de Newton, et sur le triangle des couleurs de Maxwell; ce sont là des manières de représenter les résultats expérimentaux qui sont trop connues pour qu'il soit nécessaire d'insister. Tous les renseignements désirables à ce sujet se trouvent dans l'*Optique physiologique* d'Helmholtz, et dans le *Traité d'Optique* de M. Mascart. Les principes essentiels de ces modes de représentation sont les suivants :

1° On peut rendre compte qualitativement de tout ce qui se passe dans les mélanges de couleurs au moyen d'une construction plane, chaque point du plan représentant une couleur, et le point qui définit une couleur composée étant le centre de gravité des composantes;

2° L'intensité d'une couleur composée de deux intensités α et β, de deux autres couleurs A et B, est égale numériquement à $\alpha+\beta$;

3° Toutes les unités d'intensité des diverses couleurs composées avec trois couleurs fondamentales déterminées et leurs positions sur le plan sont déterminées quand on se donne arbitrairement l'unité d'intensité et la position de ces trois couleurs, qui déterminent ce qu'on appelle le triangle des couleurs de Maxwell.

Une pareille construction ne permet donc de représenter une teinte qu'en faisant abstraction de son intensité; nous avons, pour poser le problème dans toute sa généralité, à ajouter aux notions de couleur une seule notion, celle d'intensité; la Géométrie met à notre disposition une dimension de plus que celles qui sont nécessaires pour définir les teintes : cherchons donc si nous ne pouvons pas représenter complètement les phénomènes au moyen d'un espace convenablement défini.

Définissons d'abord l'intensité des diverses lumières. La seule définition absolue est celle de l'énergie vibratoire par centimètre carré et par seconde émise par la surface éclairante, ou reçue par l'œil, suivant que l'on considère le phénomène à l'une ou à l'autre de ses phases. Cette définition présente, sur toutes celles que l'on peut établir au moyen d'étalons, l'avantage d'être immédiatement applicable à la construction d'une Table des couleurs, le principe de l'addition des intensités étant évident. Je n'ai pas construit la Table des couleurs ainsi définie, car pour l'étude actuelle je n'ai eu besoin d'aucune particularisation. Mais les belles expériences de Maxwell relatives à son triangle des couleurs, jointes à celles qui établissent la répartition de l'énergie dans le spectre, permettent, sans aucune autre difficulté qu'un travail un peu long, de résoudre la question.

Nous pouvons construire une de ces Tables pour chaque valeur de l'énergie, et alors une plage sera complètement définie si l'on indique sur quelle Table elle est prise, et en quel point. Pour distinguer entre elles ces Tables, nous pouvons les construire à une échelle proportionnelle à la quantité d'énergie qu'elles représentent, puis les superposer homothétiquement. Nous aurons une figure conique dont chaque point représentera en intensité et en teinte un éclairement déterminé. Celui-ci sera déterminé aussi par la grandeur et la direction du vecteur qui le joint au sommet du cône, point qui représente le noir absolu.

Il est aisé de voir que la teinte résultante de deux teintes s'obtient en composant par la méthode ordinaire les vecteurs des deux teintes génératrices.

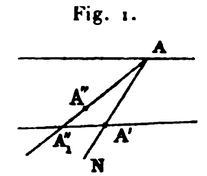
Nous voyons ainsi que tous les modes de variations entre deux plages primitivement identiques sont représentés par les variations possibles d'un vecteur, au point de vue de la différence de sensations qui peut être produite. Ceci entraîne avec soi la nécessité que, si l'on se donne une teinte A, le lieu des points A′ qui représentent des teintes que l'œil pourrait distinguer de A est un ellipsoïde. En effet, la longueur du vecteur AA′ est une fonction de la direction AA′, c'est-à-dire de dx, dy, dz, accroissements de coordonnées entre A et A′. Donc

$$\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = a\,dx + b\,dy + c\,dz,$$

en négligeant le second ordre, ce qui démontre le théorème. Je propose d'appeler cet ellipsoïde *ellipsoïde de sensibilité rétinienne.*

Il est évident que cet ellipsoïde ne sera déterminé que si l'on a soin d'opérer sur un œil dans un état bien défini, c'est-à-dire, par exemple, si l'on a soin d'opérer après une contemplation des plages assez longue pour avoir amené une sensation limite fixe. Ces ellipsoïdes jouissent d'une propriété remarquable, c'est que le vecteur du point A et le plan d'énergie constante passant par ce point sont conjugués. En effet, l'intensité et la couleur sont, dans le système que j'ai adopté, deux variables indépendantes, et qui nous apportent, indépendamment l'une de l'autre, des éléments

Fig. 1.



de différentiation entre deux plages. Soit alors A′ le point sur AN représentant la plage que l'œil pourra, par son intensité seule, distinguer de A, les teintes des deux plages étant identiques.

Dans une direction voisine AA″, le point que nous distinguerons le premier sera situé avant A''_1, situé sur le plan d'énergie constante de A′, car puisqu'à la différence d'énergie vient s'ajouter un autre élément de différenciation, la couleur, la variation d'énergie nécessaire pour la perception sera moindre que dans la direction AA′. Donc $A'A''_1$ est un plan tangent à l'ellipsoïde de sensibilité.

Ce raisonnement ne s'appliquerait pas à des Tables de couleur quelconques, car il n'y a que quand on prend l'énergie pour définition de l'intensité, que celle-ci est indépendante de la couleur. Si l'on prenait des Tables de couleurs d'un système quelconque pour faire les constructions que je viens d'indiquer, les directions conjuguées seraient la ligne NA, et le plan tangent à la surface lieu des points d'égale énergie passant par le point A.

Nous voyons donc que toutes les sensibilités autour d'un point seront déterminées si l'on connaît quatre d'entre elles, puisque

l'ellipsoïde a son centre en A, et qu'on connaît le plan conjugué de AN.

La seule conclusion que je veuille tirer actuellement de cette étude, c'est que la première question pour étudier la sensibilité différentielle de l'œil, c'est d'analyser avec soin la lumière des deux plages à distinguer.

J'abandonne ici cette étude théorique, que j'ai faite pour définir le problème, et parce que tout à l'heure elle me servira pour montrer qu'il y a toujours intérêt à laisser l'œil errer librement sur la plage observée quand on veut y distinguer des détails délicats. C'est ce que je pourrai faire quand j'aurai indiqué les principaux phénomènes produits dans l'œil par la fatigue, inhérente à son fonctionnement.

Il n'y a pas d'exemple de machine où la transformation d'énergie en vue de laquelle elle est faite s'effectue sans perte : toute machine fonctionne avec un coefficient de rendement. Il en est de même des êtres vivants. Tout organisme est soumis à une évolution continuelle, et il arrive à un régime stable par l'équilibre entre l'assimilation et la désassimilation. Toutes les machines s'usent par le fonctionnement, les machines organiques plus que toutes les autres, mais ce qui distingue ces dernières, c'est la faculté qu'elles ont de réparer, même pendant leur fonctionnement, les éléments qui s'usent.

La quantité d'énergie mise en jeu dans ce travail de reconstitution est sans importance pour l'étude actuelle, nous n'avons à retenir à son sujet qu'un seul fait, évident d'ailleurs, c'est que la quantité d'énergie de cette nature mise chaque seconde à la disposition d'un organe dépend de la composition du sang qui le baigne, et de la vitesse avec laquelle ce sang se renouvelle.

Appliquons ces idées à l'organe qui nous intéresse, à l'œil. Supposons une surface éclairée uniformément. L'œil qui la regarde prend un certain état d'équilibre, qui dépend de l'éclairement de la surface. Étudions en détail cet état d'équilibre. L'action de la lumière fatigue l'œil, c'est-à-dire qu'elle rend la partie impressionnée de la rétine moins propre à une impression ultérieure. Si l'action est assez considérable, il y a destruction complète de la rétine au point impressionné. Nous pouvons donc admettre qu'il y a toujours une destruction partielle de la rétine

par l'action de la lumière. Les expériences qui montrent ce fait sont bien simples. Si l'on fixe un objet très vivement éclairé situé au milieu d'une plage uniforme d'intensité moyenne, et si l'on supprime sans bouger l'œil la lumière vive, il semble que la plage uniforme soit moins éclairée en ce point qu'aux autres points, et la tache sombre suit les mouvements de l'œil. C'est le phénomène connu sous le nom d'*image accidentelle*. Sa durée varie suivant l'intensité de la lumière excitatrice. J'en ai obtenu une qui a duré vingt-quatre heures environ, en regardant directement le soleil pendant quatre secondes.

Cela étant, comment peut-on concevoir qu'une lumière un peu intense donne une sensation permanente? Qu'est-ce qui arrête la destruction des éléments sensibles? La sensation tend vers une limite déterminée à cause de la reconstitution des éléments détruits. L'agent de cette transformation est le sang; mais son afflux dans la rétine est limité : aussi voyons-nous deux phénomènes se produire pour lui permettre de suffire à sa tâche lorsque la lumière devient trop vive. D'abord l'iris se contracte, diminuant ainsi la quantité de lumière par unité de surface admise sur la rétine. Un autre phénomène se produit simultanément qui est beaucoup moins connu que le premier, et sur lequel je vous demande la permission d'insister un peu.

Les éléments sensibles de la rétine sont de deux espèces : les cônes et les bâtonnets. Ils sont debout et juxtaposés, formant une membrane continue. A leur partie externe, celle qui ne reçoit pas la lumière, se trouve une couche de pigment noir, le pigment rétinien. Sous l'action de la lumière, celui-ci glisse entre les éléments sensibles, diminuant leur section offerte à la lumière; de la sorte, une fraction notable de l'énergie ondulatoire qui frappe la rétine est absorbée par ce pigment noir et dégradée en chaleur. La surface d'action de la lumière étant moins grande, le sang se trouve en état de lutter contre la destruction sur cette surface limitée. Ce phénomène, observé par trois savants éminents, Boll, Kühne et Ranvier, est connu des physiologistes sous le nom de *migration du pigment rétinien*.

Si maintenant une partie de la plage éclairée se différencie par un accroissement d'intensité, cette intensité lumineuse trouvera l'œil dans l'état où il a été mis par la lumière commune aux deux

plages, c'est-à-dire qu'il en entrera une quantité limitée par la contraction de l'iris, et qu'il y en aura une partie dégradée en chaleur par le pigment rétinien. Le rendement de l'œil, considéré comme machine à transformer en influx nerveux des différences d'intensités, sera donc d'autant moindre que l'éclairement commun aux deux plages aura provoqué à un plus haut degré la contraction de l'iris et la migration du pigment. Il y a probablement d'autres phénomènes encore qui entrent en jeu, mais nous ne les connaissons pas, et ceux-là, à eux seuls, suffisent pour rendre compte des faits.

Ces phénomènes se produisent quelle que soit la couleur excitatrice. Mais, à côté de ces phénomènes, il y en a d'autres qui sont dus à la couleur de la lumière excitatrice. Quand un point de la rétine a été excité par une couleur, sa sensibilité pour cette couleur décroît plus que pour les autres, et si ensuite on regarde un champ blanc, la couleur qui a produit l'impression première étant affaiblie à cause de la fatigue qu'elle a produite antérieurement, le champ blanc paraîtra, en ce point, teinté de la couleur complémentaire. La meilleure couleur pour ces expériences est le rouge; c'est celle qui produit la fatigue la plus grande pour la rétine.

Si, au lieu de regarder un fond blanc après avoir fatigué la rétine par du rouge, on regardait un fond coloré, on verrait la couleur résultante du vert accidentel et de la couleur du fond. En somme, quand l'œil regarde une couleur, tout se passe comme si l'énergie baissait, et si la couleur se lavait de blanc, par addition d'une certaine proportion de la couleur complémentaire.

L'expérience est facile à faire par un beau jour. On n'a qu'à fixer le ciel bleu en maintenant un doigt en avant de l'œil. Si l'œil reste bien immobile pendant une quinzaine de secondes, et si l'on retire le doigt, on voit sa forme se détacher en clair sur le bleu du ciel; mais, de plus, la notion de bleu est bien plus nette pour la partie qui a été protégée par le doigt, que dans les parties voisines : celles-ci semblent lavées de gris.

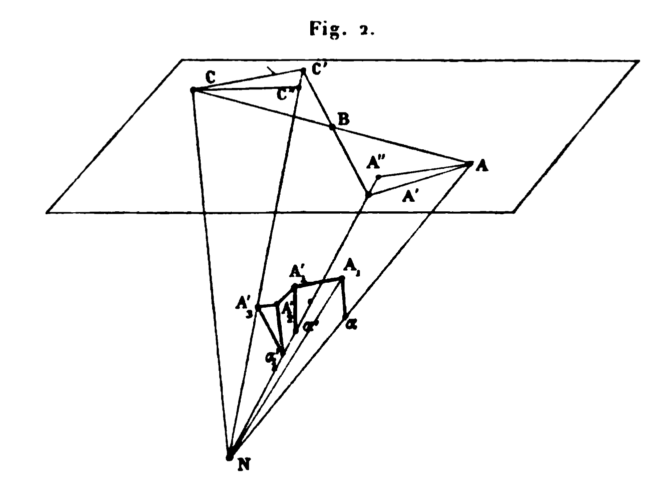
Maintenant que nous avons énoncé les lois du phénomène, cherchons à en tirer les conclusions pratiques.

Je vais d'abord montrer que, lorsqu'on veut distinguer sur une

plage des détails délicats, il faut éviter de fixer un point, et laisser au contraire l'œil errer librement sur la plage.

Soient A, A′ deux plages à distinguer et NB la ligne du blanc. Supposons d'abord l'œil immobile. On distinguera A′ de A si A′ est extérieur à un certain ellipsoïde de sensibilité. Soient C et C′ les couleurs complémentaires de A et A′. Il est évident que C est sur

Fig. 2.



AB. Par suite de la fatigue, tout se passe comme si l'intensité de chaque point baissait, et si à la teinte ainsi obtenue on ajoutait une petite quantité de la teinte complémentaire de A. Soit N le point qui représente le noir absolu, et qui est l'origine des vecteurs. Nous obtiendrons A_1 transformé de A en portant $A\alpha$ sur AN, puis αA_1 parallèle à NC. De même, A'_1 sera le transformé de A′. De même, l'ellipsoïde de sensibilité se transformera en un autre, représentant les teintes subjectives dont la rétine percevra les différences avec la teinte subjective A_1, et cet ellipsoïde aura évidemment encore les mêmes directions conjuguées que le premier, au moins à des quantités négligeables près.

Supposons que nous laissions errer l'œil sur la plage observée, et que le mouvement se fasse de manière que, pour la ligne de séparation de A et A′, la teinte A continue à impressionner des parties qu'elle a déjà impressionnées, mais que A′ vienne impressionner des parties de la rétine préalablement impressionnées

par A. Dans ce cas, ces parties étant plus fatiguées par A, qui est [illegible]lus intense que A', le point α' s'abaissera en α'_1, par exemple, et [illegible] de ce chef viendra en A'_2. Mais la variation de teinte par l'ad[illegible]ction de la complémentaire variera aussi ; c'est-à-dire qu'au [illegible] de porter $\alpha'_1 A'_2$ parallèle à NC', il faudra porter $\alpha'_1 A'_3$ paral-l[illegible] à NC. D'ailleurs, ces segments devront, à des infiniment petits s[illegible]rieurs près, correspondre à des quantités d'énergie égales, et, pa[illegible]conséquent, leurs extrémités seront dans un même plan d'éne[illegible]ie c[illegible]ante, et $A'_2 A'_3$ sera parallèle à CC'', C'' étant la projecti[illegible] co[illegible]e de C' sur le plan d'énergie constante AC, N étant le c[illegible]tre[illegible] projection. Il est aisé de voir que CC'' doit être paral[illegible]e, [illegible] infiniment petit près, à AA'', A'' étant la projection co-q[illegible]e A. En effet, la quantité de couleur complémentaire qui, [illegible]oi[illegible] à A, donne du blanc est infiniment voisine de celle qui, j[illegible]e à A'', donne du blanc. Donc $\frac{BA}{BC} = \frac{BA''}{BC''}$ d'après la définition [illegible]riangle chromatique de Maxwell. Un raisonnement analogue [illegible]ntrerait que AA'' est parallèle à $A_1 A''_2$, A''_2 étant la projection c[illegible]ue de A', sur le plan d'énergie constante passant par A_1. Or, le p[illegible]t N étant à distance finie, $A'_1 A'_2$ se confond sensiblement avec [illegible]A'_1 et la parallèle à CC'', c'est-à-dire à AA'', c'est-à-dire à A''_1 [illegible] menée par A'_2, coupera la droite NA_1. Donc le mouvement [illegible] A'_3 se fera sensiblement suivant un diamètre de la section de l'e[illegible]psoïde de sensibilité relatif à A_1, par le plan d'énergie const[illegible]e mené par A'_2.

Il [illegible] aisé de voir que, si le point A'_1 se trouve à l'intérieur de l'ellip[illegible] de sensibilité et près de sa surface, les mouvements de l'œil t[illegible]dront à le faire sortir de l'ellipsoïde, c'est-à-dire à le rendre visibl[illegible] Ceci est évident pour le mouvement diamétral dû à la coule[illegible] complémentaire. Pour l'autre mouvement, il se fait suivant la di[illegible]ction conjuguée du plan d'énergie constante, change de sig[illegible] quand on traverse ce plan, et est toujours tel qu'il se fasse d[illegible] le sens qui, compté sur le diamètre, s'éloigne du centre. Dans ces conditions, le mouvement de A'_1 dû à l'abaissement d'intensité ne peut que tendre à le faire sortir de l'ellipsoïde.

Un premier moyen pour augmenter le rendement de l'œil, considéré comme machine à percevoir des différences entre deux plages éclairées, consiste donc à donner à l'œil des mouvements

constants. Ces mouvements sont instinctifs dans la plupart des cas; cependant, quand on veut distinguer des détails délicats, on a souvent tendance à fixer un point : c'est ce qu'il faut éviter. Il suffit d'avoir regardé un disque rotatif de Masson à trait interrompu pour s'en convaincre. Généralement la dernière couronne, qui est visible à l'œil mobile disparaît, quand on fixe. Le fait a été signalé par Helmholtz dans son *Optique physiologique,* mais sans explication.

Ce que je viens de dire jusqu'ici est absolument général; ce que je vais dire maintenant ne s'applique qu'à des cas particuliers, assez nombreux, il est vrai, mais en nombre limité.

Soit à distinguer le mieux possible des couronnes engendrées par le trait interrompu d'un disque de Masson, ce trait n'étant plus fait avec de l'encre de Chine, mais avec un pigment coloré quelconque.

Quand on étudie au spectroscope la lumière diffusée par un pigment coloré mis sur du papier blanc, on voit que le pigment diffuse la couleur du spectre par laquelle on le désigne, autant ou à peu près que le papier blanc, mais que les autres couleurs sont extrêmement affaiblies. Cette étude se fait très facilement à l'aide du petit spectroscope de poche à vision directe.

Dans quelles conditions un œil se trouve-t-il donc placé pour distinguer une pigmentation délicate? Tout se passe comme s'il y avait, répandue sur toute la surface de la plage, la couleur diffusée entièrement par le pigment qui, elle, n'apporte aucun élément de différenciation, et comme si la plage entière était teintée de la couleur obtenue en retranchant au blanc la couleur du pigment, la partie pigmentée différant du reste par son intensité seule. Comment l'œil utilise-t-il dans ce cas la différence d'énergie entre les deux plages, qui est mise à sa disposition? Il est aisé de se rendre compte qu'il l'utilise mal, d'autant plus mal que la couleur du pigment est plus fatigante. Celle-ci joue, en effet, exactement le même rôle que l'énergie commune aux deux plages quand il s'agit de simples différences d'intensité. Elle produit, sans aucun bénéfice pour la distinction des plages, l'appauvrissement du sang, la contraction de l'iris, la migration du pigment, la destruction partielle des cellules.

Pour arriver à distinguer des différences de cette nature avec

une sensibilité plus grande, pour augmenter le rendement de l'œil pour la différence d'intensité mise à sa disposition, il faut donc employer un des moyens que l'Optique met à notre disposition pour tamiser les radiations, de manière à annuler l'effet des radiations nuisibles.

La sélection des rayons peut se faire dans quelques cas par la Photographie, et souvent au moyen de verres colorés convenablement choisis. Le choix de ces moyens doit être fait d'après l'analyse spectrale des lumières diffusées par les plages à distinguer.

Par exemple, si l'on a à distinguer une plage légèrement rouge d'une plage blanche, la Photographie donne immédiatement le moyen d'obtenir sur une plaque une différence d'intensité correspondant à la variation dans les radiations très réfrangibles et qui, si l'éclairement n'est pas trop intense, sera tout à fait exempt de voile correspondant aux radiations rouges communes aux deux plages.

Dans le même cas, on peut employer les verres bleus au bleu de cobalt, qui absorbent considérablement les rayons rouges. Il y a quelques verres verts qui jouissent à un plus haut degré encore de cette propriété, mais ils présentent l'inconvénient d'absorber aussi les radiations bleues qui, dans le cas qui nous occupe, sont des radiations utiles.

J'ai appliqué les résultats de l'étude précédente à l'étude des éruptions de la peau qui se produisent dans un grand nombre de maladies. Mon attention avait été appelée sur ce sujet par l'observation de Vogel, de Berlin, observation qui se trouve dans un grand nombre de traités de Photographie. Ce photographe remarqua sur un cliché un grand nombre de taches localisées aux mains et au visage, et apprit ensuite que son modèle avait été atteint peu après avoir fait faire son portrait, de la petite vérole. Il n'avait rien remarqué au moment de la pose. J'ai commencé par chercher à vérifier ce fait, et je l'ai vérifié sur trois malades atteints d'eczéma, dont j'ai vu l'éruption sur la Photographie faite vingt-quatre heures avant l'apparition à l'œil nu de l'éruption. C'est lorsque j'ai eu vérifié ce fait que j'ai cherché à me l'expliquer, ce qui m'a amené aux études que j'ai eu l'honneur de vous exposer, et à l'idée de chercher dans l'emploi d'un verre coloré un perfec-

tionnement à la vue des éruptions. C'est le verre appelé dans le commerce bleu XIII[ième] qui m'a donné les meilleurs résultats. L'analyse spectroscopique montre, en effet, que, lorsqu'on passe d'une surface de peau saine à une tache éruptive, la variation est d'autant plus grande que la couleur est plus réfrangible. Les verres verts sont à cause de cela moins bons que les verres bleus, car ils absorbent sélectivement les rayons très réfrangibles.

Ceux-ci présentent d'ailleurs un inconvénient. S'ils suppriment presque absolument les rayons rouges, ils absorbent notablement tous les rayons. Or, c'est un fait bien connu que, lorsqu'on a à percevoir un rapport déterminé d'intensité, il faut opérer avec un éclairement total assez vif, et que, lorsque l'intensité décroît suffisamment, le plus petit rapport d'intensité perceptible décroît très vite. J'ai eu l'honneur, il y a quelque temps, de dire ici-même que si δI est l'accroissement d'intensité entre deux plages, la courbe de $\frac{\delta I}{I}$ en fonction de I était une hyperbole ayant l'asymptote verticale $I = o$, ce qui montre bien la vitesse de variation de $\frac{\delta I}{I}$ au-dessous d'une certaine valeur de I. Il faut donc, pour avoir réellement intérêt à se servir du verre bleu, opérer avec un éclairement assez considérable, d'autant plus considérable que le verre qu'on emploie est plus intense. La source de lumière n'est pas non plus indifférente, il faut éviter les sources riches en radiations rouges, et rechercher celles qui contiennent surtout des radiations très réfrangibles.

Avant d'abandonner cette question, je veux, en terminant, vous dire quelques mots sur l'emploi de la Photographie. J'ai vu, par un insuccès que j'ai eu, la nécessité d'employer un éclairement faible, et une longue pose. L'explication de ce fait peut, il me semble, être tentée au moyen de quelques propriétés connues de la plaque photographique. Le capitaine Abney a montré que, pour les éclairements faibles, le temps de pose, pour obtenir une impression déterminée, croissait plus vite que l'ouverture de l'éclairement. J'avais de plus remarqué moi-même un fait qui m'a été rappelé par une Note de M. Guillaume dans la *Revue des Sciences,* et qui avait, d'ailleurs, paraît-il, été souvent remarqué, c'est que, au-dessous d'une certaine valeur de l'éclairement, l'impression photographique est nulle, quel que soit le temps de pose. Un raison-

nement *a priori* montre que, dans ces conditions, si l'on a à différencier deux plages, et si l'on peut amener l'éclairage de la moins intense juste au minimum d'impression, on aura sur la plaque, après un temps assez long, un contraste aussi violent qu'on voudra entre les deux plages. Que se passe-t-il quand l'éclairement, sans atteindre cette limite extrême, diminue suffisamment?

Nous avons une fonction qui pourra représenter les faits, au moins dans un champ de variation assez étroit, si nous supposons entre I, grandeur de l'impression, E, éclairement, t temps de pose, une relation de la forme

$$I = f(E - E', t),$$

où E' représente le minimum lumineux nécessaire pour impressionner la plaque; f est une fonction assujettie seulement à s'annuler pour $E = E'$ quel que soit t. Soient deux plages différant entre elles d'une quantité de pour l'unité d'éclairement; pour l'éclairement E elles différeront de $E\,de = dE$. Elles poseront le même temps t, et il y aura entre elles une différence d'impression sur la plaque dI, reliée à dE par la formule

$$dI = f'_{E-E'}(E - E', t);$$

ce qui nous intéresse pour la perception de la différence sur le cliché examiné à l'œil, c'est, d'après la loi de Bouguer-Masson, la valeur de

$$\frac{dI}{I} = \frac{f'}{f}\,E\,de;$$

or $f = o$ pour $E = E'$ et si fp est la première dérivée de f qui ne s'annule pas pour $E = E'$, le rapport $\frac{f'}{f}$ tend vers $\frac{fp}{fp-1}$ par la règle de l'Hospital, et ceci est infini pour $E = E'$.

Pour avoir du modelé, il faut rechercher des plaques ayant une impression croissant le plus vite possible avec la lumière, et opérer près de leur minimum d'impression, en posant longtemps.

Je n'ai pas voulu passer sous silence ce fait, qui me paraît important non seulement parce qu'il explique bien des faits connus de ceux qui s'occupent de Photographie, mais parce qu'il me semble expliquer, d'une façon nette et satisfaisante, un des grands faits qui ont été découverts ces dernières années : je veux parler de

l'existence de ces étoiles nouvelles que la Carte photographique du Ciel a révélées, alors que l'œil, même armé des plus puissants instruments, n'a aucune notion de leur existence.

Sur la constitution des ondes paragéniques de diffraction, et les franges des réseaux parallèles;

PAR M: GEORGES MESLIN.

J'ai étudié précédemment (1) les franges rigoureusement achromatiques, c'est-à-dire alternativement blanches et noires obtenues à l'aide d'un réseau; or, si on continue à les observer de plus en plus près du réseau, elles deviennent de plus en plus fines et l'on voit apparaître des colorations distribuées de la façon suivante : les franges noires continuent à rester sombres, mais, sur deux franges brillantes consécutives, l'une d'elles s'illumine en violet, tandis que l'autre se colore en jaune; le même phénomène se produit dans tout le champ qui se trouve alors couvert de ces deux couleurs alternées; la périodicité existe encore, mais il faut traverser deux franges noires pour retrouver la répétition des mêmes apparences; en avançant lentement le microscope, on observe une grande variété de couleurs, mais celles qu'on observe le plus généralement sont le violet-mauve associé au jaune, le vert associé au rose, ou encore le bleu à côté du blanc ou blanc-jaunâtre; les deux couleurs associées sont donc à peu près complémentaires, et, pendant ce déplacement, on retrouve à plusieurs reprises les mêmes apparences qui deviennent plus complexes lorsque la distance est plus faible encore : les franges noires sont alors très fines, l'intervalle de deux d'entre elles se resserre, tandis que l'intervalle voisin s'élargit et se subdivise en bandes colorées avec un axe bleu, rose ou jaune; dans tous les cas, le phénomène reste périodique.

Enfin, en continuant à approcher, les colorations deviennent

---

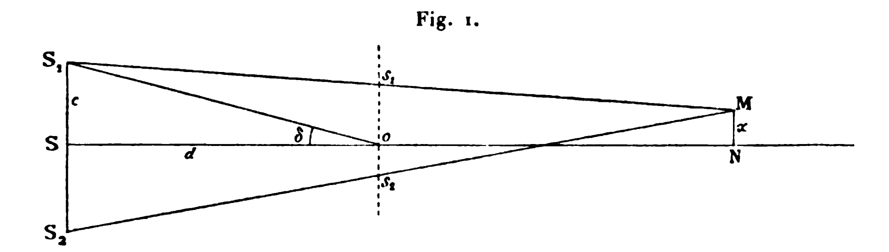
(1) *Journal de Physique*, 3e série, t. III, p. 168 (avril 1894).

moins vives jusqu'au moment où l'on vise le réseau lui-même; elles apparaissent de nouveau lorsque l'on vise au delà ([1]).

Ces alternances colorées ne peuvent guère s'expliquer par la théorie approchée que nous avons exposée précédemment; voici en outre deux expériences qui suscitent de semblables difficultés :

Lorsqu'on déplace transversalement le point S, S_1 et S_2 étant entraînés dans ce mouvement (*fig.* 1), les franges devraient se déplacer dans le même sens; or *elles se transportent en sens in-*

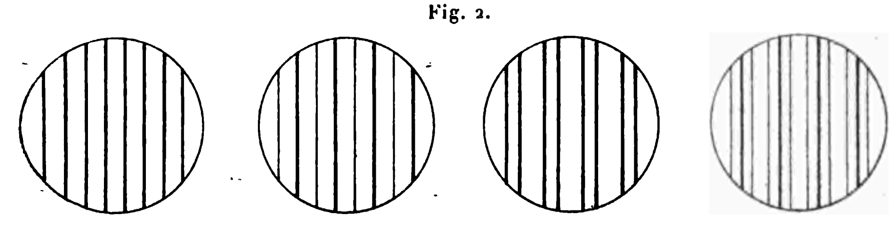
Fig. 1.



verse. De même, lorsqu'on déplace transversalement le réseau, S_1 et S_2 restent immobiles, comme le démontre le raisonnement qui sert à les obtenir ([2]); or, *les franges se déplacent d'un mouvement continu dans le sens de la translation.*

([1]) Pour pouvoir faire plus commodément des mesures, j'ai cherché à obtenir des photographies de ces phénomènes; je les ai exécutées en transformant l'ocu-

Fig. 2.

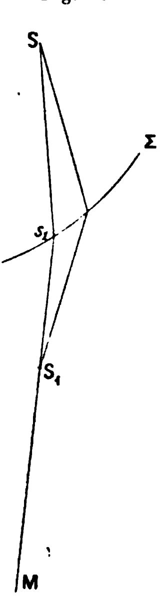


laire du microscope en chambre noire et en y introduisant de petites plaques sensibles orthochromatiques de 1^cm de côté; la chambre où l'on opérait était rendue obscure et le microscope, placé dans un chevron fixé dans l'embrasure de la fenêtre, recevait les rayons solaires tombant sur la fente. Ces photographies peuvent ensuite être examinées avec un fort grossissement et l'on y retrouve des dispositions périodiques et différentes pour chaque phénomène coloré; la *fig.* 2 représente quelques-unes de ces dispositions.

([2]) *Voir* Mascart, *Optique*, t. I, p. 366.

Ces difficultés proviennent de ce qu'on a assimilé les ondes paragéniques aux ondes ordinaires, alors qu'elles ont une constitution toute différente. Lorsque des rayons lumineux émanés d'un point S subissent une réflexion ou une réfraction sur une surface aplanétique Σ (*fig.* 3), ils vont passer par un point S_1

Fig. 3.



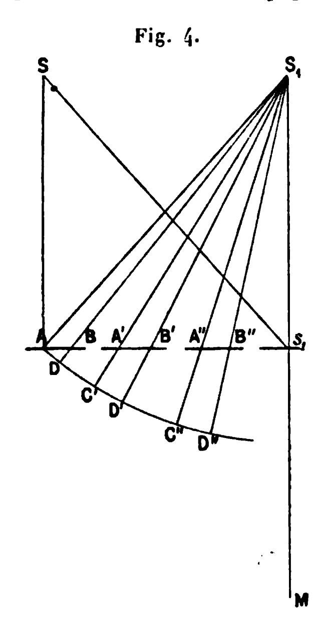
réel ou virtuel; on sait qu'en vertu du principe d'Huygens, les différents chemins qui vont de S en S_1 sont parcourus en des temps égaux, de sorte que la phase en S_1 diffère de la phase en S d'une quantité constante, indépendante de la direction considérée pour la propagation du mouvement vibratoire. De même, en étudiant l'action exercée en un point M, on reconnaît que cette action provient d'une très petite zone de la surface Σ avoisinant le point s_1 où la droite MS_1 coupe Σ, le chemin Ss_1M jouissant de la propriété d'être de durée minimum. On peut en outre démontrer que l'action est la même sur tous les points M situés sur une sphère décrite de S_1 comme centre : en un mot, la nouvelle onde a une structure uniforme.

Ces propriétés ne se retrouvent plus pour les ondes parage-

niques de diffraction obtenues en faisant tomber sur un réseau les rayons émanés de S.

1° Les mouvements vibratoires envoyés en S_1 (image diffractée de S) par les différents points du réseau ne sont plus concordants entre eux; d'après la méthode qui sert à déterminer S_1, on reconnaît que deux points homologues (*fig.* 4) A, A', de deux

Fig. 4.



éléments consécutifs envoient en S_1 (réellement ou virtuellement) des mouvements qui concordent ou plutôt qui diffèrent de λ; de même, deux autres points homologues B, B' envoient aussi des mouvements concordants entre eux, mais le mouvement émané de A ne concorde plus avec le mouvement émané de B et les mouvements reçus en S_1 ont une phase qui croît d'une façon continue au fur et à mesure que change autour de S_1 la direction suivant laquelle ce mouvement lui parvient; cette phase augmente de λ lorsqu'on passe d'un point du réseau au point homologue de l'élément adjacent.

2° Cette propriété se retrouve pour les différentes ondes dont le centre est en S_1; la phase y varie d'une façon continue; on démontre de même que l'amplitude y change d'une façon pério-

dique, de sorte qu'une telle onde, au lieu d'avoir une constitution uniforme, a une structure *crénelée* qui est en rapport avec la structure périodique du réseau qui lui a donné naissance.

3° Le chemin Ss_1M ne représente plus maintenant le trajet de durée minimum, et l'on peut se demander pourquoi il y a encore une zone efficace autour du point s_1, pourquoi, en un mot, la lumière semble provenir du point s_1 comme l'expérience l'indique; quelle est la propriété dont jouit cette direction S_1M, qui la différencie des directions voisines. On reconnaît aisément que c'est au voisinage de cette direction que se trouvent, sur deux éléments consécutifs, deux points homologues envoyant en M des mouvements différents de λ; ou enfin, *c'est au voisinage de s_1 que se trouvent deux éléments qui envoient des mouvements infiniment voisins d'être concordants;* telle est la propriété qui caractérise dans ce cas la région efficace; les régions éloignées de s_1 envoient des mouvements qui se détruisent par interférence par suite de la modification de la propriété précédente à mesure qu'on s'éloigne de s_1.

4° Le raisonnement précédent justifie la substitution du point S_1 au point S, mais il en résulte quelques conséquences nouvelles; nous avons admis que le mouvement provenait sensiblement du point s_1; dans le cas des ondes ordinaires, cette hypothèse ne suscite guère de difficultés, car, si on tient compte de la zone efficace, on peut démontrer, en s'appuyant sur le synchronisme des différents points de l'onde, que le mouvement vibratoire peut être considéré comme émané de s_1, à condition d'ajouter un retard fictif égal à $\frac{\lambda}{4}$; ici le calcul sera loin d'être aussi simple : 1° parce que la phase varie d'une façon continue sur l'onde qui passe par s_1; 2° parce que l'amplitude subit en même temps des variations, le mouvement vibratoire émané des différents points d'un même élément du réseau n'ayant pas la même grandeur à cause de la constitution même de l'élément. En composant au point s_1 ces mouvements, on se trouvera amené, pour tenir compte de la zone efficace, à ajouter un retard φ_1 déterminé par la position de s_1 sur l'élément et à multiplier l'amplitude par un facteur a_1 périodiquement variable dans les mêmes conditions.

5° On voit donc que, pour calculer la phase en M, il faut con-

naître la phase en s_1, y ajouter le retard φ_1 et celui qui correspond à s_1M; mais le retard en s_1 ne peut se calculer d'après la phase en S_1 augmenté du retard S_1s_1, car on a vu que la phase en S_1 n'est pas déterminée et qu'elle varie avec la direction considérée, si bien que, si on calcule ce retard par rapport à S_1 considéré comme centre d'une onde ordinaire, il devient nécessaire d'ajouter un terme complémentaire ψ_1 pour tenir compte de la correction en question. Le retard ainsi calculé sera la somme de trois termes $\chi_1 + \psi_1 + \varphi_1$.

χ_1 qui représente la distance S_1M.

ψ_1 qui tient compte de la position de s_1 sur le réseau.

φ_1 qui tient compte de la zone efficace qui entoure s_1, c'est-à-dire de la position de s_1 sur cette zone.

6° Considérons alors un point S éclairant un réseau, les rayons se diffractent à droite et à gauche en formant des ondes paragéniques dont les centres sont en S_1 et S_2 (*fig.* 1); soit un point M qui reçoit de la lumière diffractée qui provient de ces deux sources, la phase du premier mouvement est $\chi_1 + \psi_1 + \varphi_1$; la phase du second est $\chi_2 + \psi_2 + \varphi_2$; la différence de phase est

$$\chi_1 - \chi_2 + \psi_1 - \psi_2 + \varphi_1 - \varphi_2.$$

On peut démontrer (*voir* pour cette démonstration le *Mémoire* complet) que la somme des quatre premiers termes est constamment nulle.

Il ne reste donc que le retard $\varphi_1 - \varphi_2$; φ_1 est une fonction périodique représentée par (I) (*fig.* 5); φ_2 est représentée par une courbe symétrique de la première (II) ou obtenue par le déplacement de celle-ci, si elle présente elle-même une symétrie comme l'élément du réseau; $\varphi_1 - \varphi_2$ est représenté par la différence d'ordonnées de ces deux courbes et on reconnaît, qu'en général, $\varphi_1 - \varphi_2$ n'est pas nul sauf aux points où les deux courbes se coupent, et on peut montrer que cette circonstance se présente à des intervalles égaux à ceux qui séparent les points où la théorie approchée prévoyait l'existence d'une frange brillante. Calculons en effet la distance $Os_1 = u_1$ (*fig.* 1) et supposons pour fixer les idées que S se trouve sur la normale au milieu d'un élément; on a

$$\frac{c - u_1}{c - x} = \frac{d}{y}, \qquad u_1 = c - \frac{d}{y}(c - x) = n\lambda d - \frac{d}{y}\left(n\lambda d - \frac{ky}{4nd}\right).$$

Calculons de même $Os_2 = u_2$:

$$\frac{c - u_2}{c + x} = \frac{d}{y}, \qquad u_2 = c - \frac{d}{y}(c + x) = n\lambda d - \frac{d}{y}\left(n\lambda d + \frac{ky}{4nd}\right);$$

le nombre d'éléments du réseau contenus dans u_1 et u_2 est $u_1 n$ et $u_2 n$, la différence du nombre d'éléments est

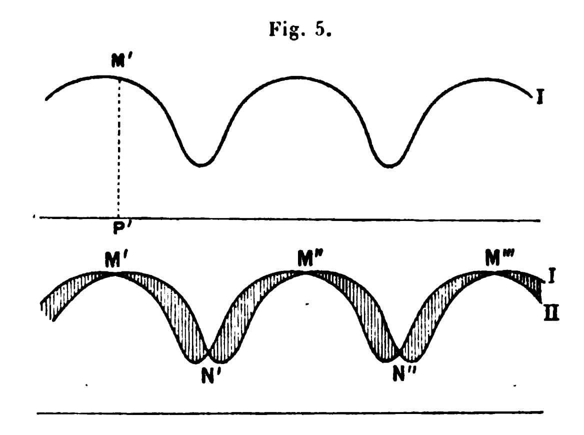
$$(u_1 - u_2) n,$$

ce qui donne

$$\frac{k}{2},$$

et comme, aux points en question, k est un nombre pair, il en

Fig. 5.



résulte que les deux segments Os_1 et Os_2 ne diffèrent que par un nombre entier d'intervalles du réseau; les fractions d'éléments sont les mêmes de part et d'autre et les deux points s_1 et s_2 sont tels que, *reportés sur un même élément, ils sont symétriques l'un de l'autre;* les quantités φ_1 et φ_2, qui sont déterminées par cette position de s_1 et de s_2, auront donc la même valeur, ainsi que les coefficients a_1 et a_2 ; il y a donc concordance complète en ces points, mais en ces points seulement.

Si le point S ne se trouvait pas sur un axe de symétrie du réseau, la conclusion précédente subsisterait pour tous les points obtenus par l'intersection de l'écran avec les différentes droites qui joignent le point S, soit au milieu d'une partie opaque, soit au milieu d'une partie transparente; en ces points, les mouvements

vibratoires s'ajoutent intégralement; aux points voisins, cette concordance n'existe plus, il y a une différence de phase qui peut atteindre une fraction notable de λ; si elle approche de $\frac{\lambda}{2}$, l'interférence sera de plus en plus complète et il y aurait même destruction totale du mouvement, s'il n'y avait de variation du facteur qui modifie l'amplitude; on aura donc une frange sombre qui se dédoublera en deux autres lorsque, entre deux points de concordance, le retard pourra prendre une valeur supérieure à $\frac{\lambda}{2}$.

Cette théorie montre que les franges brillantes sont les projections déterminées par S sur l'écran des milieux des parties opaques et transparentes; il doit donc y en avoir deux fois plus que d'éléments projetés dans le même espace; c'est ce qui résulte des mesures faites antérieurement (*Journal de Physique,* avril 1894; p. 170). Leur liaison avec le faisceau de droites qui les déterminent montre comment elles doivent se déplacer par le mouvement transversal du réseau ou de la source, conformément à ce qu'on a vu plus haut. Enfin, les colorations décrites s'expliquent à leur tour par l'introduction du coefficient a_1; en effet, en un point M où il y a maximum, il y a concordance pour toutes les couleurs; mais chacune d'elles ne conserve pas la même intensité relative que dans la lumière blanche, l'amplitude étant multipliée par la quantité a_1, variable avec la position de s_1 sur l'élément; or, le point S_1 varie avec la couleur et il en est de même de s_1, bien qu'en ces points on ait toujours $a_1 = a_2$; mais a_1 est une fonction de λ et la couleur au point où il y a concordance sera représentée par Σa_1^2; autrement dit, le point M ne *voit* pas le spectre diffracté de la même manière dans toute son étendue et ces différences sont déterminées d'après *l'ombre* du réseau projeté par le point M sur le spectre.

D'où vient alors que ces maxima présentent deux teintes différentes alternées? Il est facile d'en voir la raison en considérant l'expression déjà donnée de u_1; on reconnaît que la différence des valeurs de u_1 pour deux valeurs successives et paires de k est $\frac{1}{2n}$, c'est-à-dire la moitié d'un élément; si donc, on prend les maxima de numéros pairs 0, 2, 4, 6, ils seront tous identiques entre eux puisque les points tels que s_1 sont de même nature *pour chaque*

couleur en chacun de ces maxima, quoique d'une nature différente lorsqu'on passe d'une couleur à l'autre; de même, les maxima de numéros impairs 1, 3, 5, 7 seront encore identiques entre eux quoique différents des précédents, puisque chaque point s_1 change de nature.

Si le point M est assez éloigné pour que le spectre soit recouvert par l'ombre d'un grand nombre d'éléments, ce spectre pourra se subdiviser en un certain nombre de régions (violet, indigo, bleu, etc.) pareillement modifiées au point de vue de l'intensité; cette modification pourra être représentée par un sinusoïde ayant de nombreuses périodes dans le spectre (*fig.* 6, ligne 1); il en résultera pour les deux maxima des teintes blanches pour une raison analogue à celle qui fait disparaître les colorations dans les interférences à grande différence de marche; on aura donc des franges achromatiques. Mais, si les distances deviennent plus petites et s'il suffit d'un petit nombre d'éléments pour recouvrir le spectre vu du point M (*fig.* 6, ligne 2), l'indigo sera maximum, par exemple, ainsi que l'orangé, tandis que le vert et le rouge seront affaiblis; la même apparence se manifestera pour les autres maxima de même espèce pour lesquels la courbe précédente se transporte d'une période; en la transportant seulement d'une demi-période (*fig.* 6, ligne 3), on voit que, pour le maximum voisin, le vert et le rouge seront au contraire plus énergiques, le bleu et le jaune seront diminués; ces maxima consécutifs se coloreront donc de teintes différentes qui seront sensiblement complémentaires.

Si enfin le spectre était plus petit que l'ombre d'un élément, toutes les couleurs seraient à peu près modifiées de la même manière et les teintes s'affaibliraient (*fig.* 6, ligne 4).

Ainsi, en tenant compte seulement de l'influence du facteur a_1, on voit que le phénomène est caractérisé par le nombre p d'éléments du réseau projetés sur le spectre entre les longueurs d'ondes extrêmes λ et λ'; ce nombre d'éléments est donné par

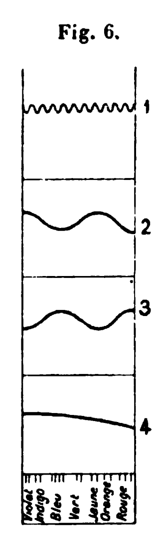
$$\frac{\left(nd - \frac{nd^2}{y}\right)(\lambda - \lambda')}{\frac{1}{n}}.$$

On a donc

$$\frac{\left(nd - \frac{nd^2}{y}\right)(\lambda - \lambda')}{\frac{1}{n}} = p \quad \text{ou} \quad \frac{1}{d} + \frac{1}{y-d} = \frac{n^2(\lambda - \lambda')}{p};$$

d et $y - d$ varient en sens inverse l'une de l'autre, comme les distances à une lentille d'un objet et de l'image qu'elle fournit. Lorsqu'on diminue la distance d, on reporte donc à des distances

Fig. 6.



de plus en plus grandes le point A_p à partir duquel le phénomène caractérisé par le nombre p se produit; si l'on remplace p par $p - 1$, le point A_{p-1} est plus rapproché du réseau; on a donc une série de points A_p, A_{p-1}, A_{p-2}, ..., de plus en plus voisins du réseau, aux environs desquels le phénomène revêt une apparence nouvelle, caractéristique des nombres p, $p - 1$, $p - 2$, ...; tous ces points s'éloignent du réseau lorsque d diminue. La formule précédente peut se vérifier dans sa marche générale en se repérant sur un des premiers phénomènes colorés bien déterminé, par exemple, un rose violacé associé à un jaune vert : pour mon réseau au $\frac{1}{50}$, placé à 20^{mm} de la fente, ces teintes apparaissaient également à 20^{mm} au delà du réseau; ces nombres permettent, à l'aide de la formule précédente, une évaluation du nombre p cor-

respondant. On a

$$\frac{2500(0,000600 - 0,000450)}{p} = \frac{1}{20} + \frac{1}{20}$$

d'où

$$p = 3,75,$$

pour ce phénomène; le spectre est à peu près divisé en trois segments par l'ombre de trois éléments du réseau ([1]).

J'ai tenu enfin à mettre en évidence la variation du coefficient a_1 qui est la cause de la production des colorations : si la théorie précédente est exacte, en recevant sur un écran placé en M l'action d'une seule des ondes paragéniques S_1, chacune des radiations apporte aux différents points de l'écran une amplitude variable, d'où la production de maxima et de minima en lumière homogène, de colorations en lumière blanche sans que la phase intervienne dans ce phénomène qui ne dépend pas à proprement parler des interférences, bien que *sa période soit la même que celle du phénomène interférentiel.*

Pour le vérifier, il suffit de couvrir la moitié du réseau avec un écran; en visant au microscope dans la région où se produisent les franges colorées, on voit le champ divisé en trois parties : d'un côté, une région obscure qui ne reçoit de lumière ni de S_1 ni de S_2, de l'autre une région éclairée qui reçoit l'action de S_1 et de S_2; on y voit les franges habituelles; enfin, une région intermédiaire qui reçoit seulement l'action de S_1, on y voit, en effet, des franges bien moins vives, mais dont la période est de même grandeur, quoique constituée d'une façon toute différente. L'expérience ne réussit pas lorqu'on vise une région où se produisent les franges achromatiques : la région intermédiaire existe néanmoins; mais on n'y distingue pas les franges en question : cette particularité vient précisément à l'appui de la théorie présentée, car la production des franges achromatiques provenait de ce que l'amplitude de la variation du coefficient a_1 dans le spectre deve-

---

([1]) On peut rapprocher ce nombre du résultat que l'on obtient en cherchant à quel moment les colorations disparaissent dans les interférences ordinaires (miroir de Fresnel, anneaux de Newton, phénomène de polarisation chromatique ou rotatoire); on reconnaît que la lumière paraît sensiblement blanche lorsque son spectre présente environ cinq cannelures.

nait trop faible ainsi que trop rapide et que le phénomène était dû tout entier à la différence de phase $\varphi_1 - \varphi_2$; cette même raison explique la disparition des maxima et minima qui sont dus uniquement à la variation de a_1 et nullement au retard $\varphi_1 - \varphi_2$.

Application aux franges de l'ouverture des réseaux parallèles. — En s'appuyant sur les résultats précédents, on peut expliquer la production des franges dites de l'ouverture dans l'expérience des réseaux parallèles. On sait que ces franges sont indépendantes de la forme, de la grandeur et de l'orientation de la fente; elles n'exigent pas une position particulière de l'écran ou de la fente et l'emploi d'une lentille n'est pas indispensable : leur caractère essentiel est d'offrir des colorations alternées qui présentent d'ailleurs le même aspect que celles qui sont produites par *une* fente éclairant *un* réseau; il suffit donc de se reporter à la description faite plus haut. Toutefois, il y a une différence importante à signaler à cause de la théorie qui va être exposée : c'est que les franges noires, qui étaient très fines dans le premier cas, manquent ici de netteté; en général, le second phénomène ne reproduit pas les parties délicates du premier, mais seulement les bandes qui ont une certaine largeur.

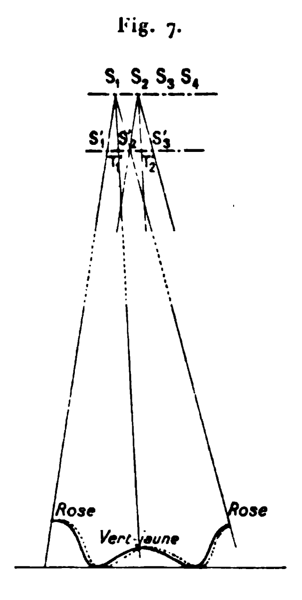
Nous considérerons les N fentes du premier réseau comme produisant chacune les mêmes phénomènes dont on observe la superposition, la netteté étant néanmoins conservée, *à cause de la petitesse de la partie utilisée des réseaux et de la corrélation particulière qui existe entre leurs périodes.* Soient S_1, S_2, S_3, ... (*fig.* 7) les fentes du premier réseau directement éclairé et S'_1, S'_2, S'_3 les fentes qui constituent le second ou plus exactement les milieux des ouvertures : soient T'_1, T'_2, T'_3 les milieux des parties opaques.

Considérons l'action exercée à grande distance par la fente S_1 ; on a vu qu'il doit se produire sur un écran une série de franges alternativement obscures et brillantes [1], les franges brillantes se trouvant dans les directions qui joignent le point S_1 aux points S'_1, S'_2, S'_3, ..., T'_1, T'_2, T'_3, les franges obscures se produisant entre

[1] Pourvu que S_1 soit assez rapproché du réseau; *voir* la formule de la page 141.

les franges brillantes ; ces franges sont achromatiques si la distance de la fente au deuxième réseau est assez grande, mais elles se colorent si cette distance devient inférieure à une certaine limite, qui est environ de 1^{cm} pour un réseau au $\frac{1}{50}$ (¹); les couleurs pré-

Fig. 7.



sentent alors une alternance, par exemple vert et rose, et on peut dessiner schématiquement le phénomène par une courbe analogue à celle qui est à la partie inférieure de la figure; il importe de remarquer que ces franges ont une largeur qui atteint souvent plus de 1^{cm} et qui est, dans tous les cas, incomparablement plus grande que la période du réseau et même plus considérable que la portion utilisée de ce réseau.

La fente voisine S_2 va donner lieu à la production du même phénomène dans les directions $S_2S'_1$, $S_2S'_2$, $S_2S'_3$; mais, si ces deux réseaux ont même période, ces droites forment un faisceau identique au premier, déplacé par rapport à lui de $\frac{1}{50}$ de millimètre dans le sens S_1S_2 et comme, par sa rencontre avec l'écran,

(¹) Il suffit, dans la formule de la page 141, de remplacer $y-d$ par ∞ et p par 3,75 pour déterminer quelle doit être la valeur de d nécessaire pour que le phénomène correspondant (rose et vert) se produise à une grande distance.

il indique les positions des franges, on obtiendra un phénomène identique au premier, qui s'y superposera à $\frac{1}{60}$ de millimètre près, car le deuxième est représenté par la courbe ponctuée extrêmement voisine de la première.

Il en sera de même des phénomènes produits par les autres fentes qui donnent toutes les mêmes apparences avec un déplacement dont le maximum est égal à la partie utilisée du réseau.

L'ensemble donnera donc lieu à la production d'un phénomène plus intense, qui pourra s'observer directement sur un écran et de loin; autrement dit, le premier réseau avec ses N fentes permet d'utiliser toute la lumière solaire qui tombe sur une largeur de plusieurs centimètres et qui, concentrée par une lentille, l'éclaire directement; il donne sensiblement et avec plus d'éclat les mêmes apparences qu'une fente unique éclairant un réseau; mais cet avantage est racheté au prix d'une légère confusion dans les détails délicats; à cause du déplacement signalé, on conçoit que les lignes trop fines dont la largeur serait comparable à ce déplacement, seront confuses ou disparaîtront; on voit donc pourquoi on améliorera le phénomène en réduisant ce déplacement : il n'y aura qu'à réunir les rayons avec une lentille et à mettre les réseaux dans la région où le faisceau est le plus étroit, c'est-à-dire au foyer. Tel est le rôle de la lentille habituellement employée.

Bien des faits peuvent être invoqués à l'appui de cette théorie :

1° On sait, par les expériences de M. Garbe ([1]), qu'en déplaçant transversalement un des réseaux, d'une période, les franges se déplacent d'une période dans un sens ou dans l'autre;

2° On peut constater que la période *entière* des franges (deux colorations), correspond à une largeur égale à la période du second réseau projeté sur l'écran par un point du premier;

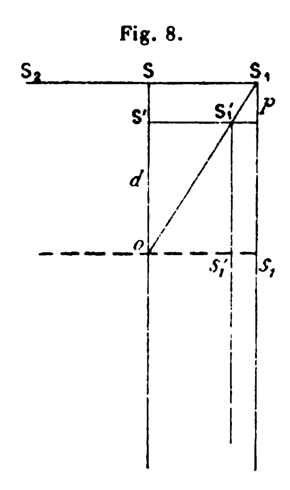
3° En éloignant le premier écran du second, on constate que les mêmes apparences se produisent à plusieurs reprises et, si on opère en lumière homogène, on retrouve une périodicité très régulière; il est facile de s'en rendre compte : considérons une fente unique S éclairant un réseau et donnant les deux images virtuelles S_1 et S_2; étudions l'action produite au loin, au centre du champ

---

([1]) Garbe, *Journal de Physique*, p. 45; 1890.

dans la direction de la normale au réseau que nous supposerons être une direction de concordance; on a vu que le phénomène dépendait de la nature du point s_1 (*fig.* 8). Lorsque le point S se

Fig. 8.



rapproche, S_1 décrit la droite OS_1 et le point s_1 se déplace sur le réseau; le phénomène central change donc de nature, mais il reprendra le même aspect lorsque S_1 sera arrivé en S'_1 au-dessus de s'_1, point homologue de s_1 sur l'élément voisin; il y a donc une période p qu'il est facile de calculer à l'aide des deux triangles semblables. On a

$$\frac{p}{d} = \frac{\frac{1}{n}}{c} = \frac{\frac{1}{n}}{n\lambda d}, \qquad p = \frac{1}{n^2\lambda};$$

cette période est indépendante de d; elle est donc constante, inversement proportionnelle à la longueur d'onde et le produit $p\lambda$ doit être égal à $\frac{1}{n^2} = \frac{1}{2500} = 0,000400$.

Si nous faisons $n = 50$, $\lambda = 0,000589$, on trouve

$$p = 0^{mm},677.$$

Or, en nous reportant au Mémoire de M. Garbe déjà cité, nous pouvons lire ce qui suit : « Lorsque l'on écarte graduellement les réseaux, les teintes se modifient, disparaissent même, se changent l'une dans l'autre et finalement reprennent leurs valeurs primi-

tives pour se transformer suivant les mêmes alternatives, mais avec des nuances de moins en moins vives. On constate que les déplacements par lesquels on retrouve la même apparence sont égaux, et leur valeur, dans mon appareil de réseaux au $\frac{1}{50}$ de millimètre était de $0^{mm},67$. Elle varie du reste en lumière homogène et va en croissant du rouge au violet. »

Frappé de cette coïncidence, j'ai communiqué ce résultat à M. Garbe qui a bien voulu me transmettre l'extrait suivant de son cahier d'expériences faites à la date du 2 mars 1889.

« En résumant ce qui précède, on voit que l'on a pour la période p :

	λ.	p.	λp.
	μ	mm	
Verre rouge	0,62	0,64	0,0003968
Sodium	0,588	0,68	0,000401
Thallium	0,535	0,74	0,0003959

On peut dire que la proportion inverse des périodes aux longueurs d'ondes est parfaite et que le produit en μμ est voisin de 400. »

La vérification de la formule $p = \frac{1}{n^2 \lambda}$ est donc aussi satisfaisante que possible.

4° On peut enfin tirer de nombreuses vérifications en associant deux réseaux dont les périodes sont différentes, mais sont des multiples l'une de l'autre. Je renvoie pour ces vérifications au Mémoire complet, qui sera inséré dans les *Annales de Chimie et de Physique*.

Sur la turbine « de Laval » ;

Par M. K. Sosnowski,

L'histoire de la turbine à vapeur n'est pas précisément récente.

Depuis que l'on a établi la *théorie* de la machine à vapeur, que l'on a trouvé les causes inévitables du faible rendement générique de cet imparfait transformateur de l'énergie calorique en énergie

mécanique, depuis que l'on a reconnu que la machine à vapeur a donné à peu près tout ce qu'on en pouvait tirer et que les seuls perfectionnements à en attendre sont ceux résultant d'une con-

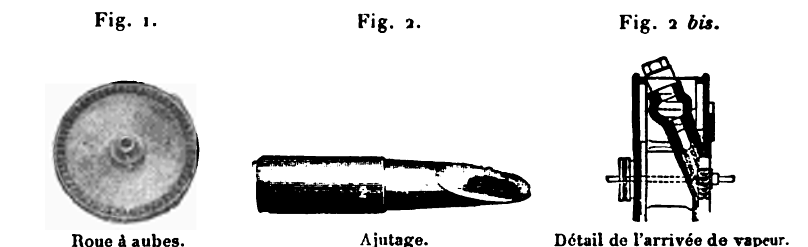


Fig. 1. Roue à aubes. Fig. 2. Ajutage. Fig. 2 *bis*. Détail de l'arrivée de vapeur.

struction de plus en plus soignée, on s'est tourné d'un tout autre côté.

Au lieu de continuer à utiliser *la pression* de la vapeur, on a pensé à laisser cette vapeur se détendre d'elle-même, en prenant *la vitesse* déterminée par les pressions de deux milieux où l'on opère (chaudière et condenseur ou atmosphère) et à utiliser

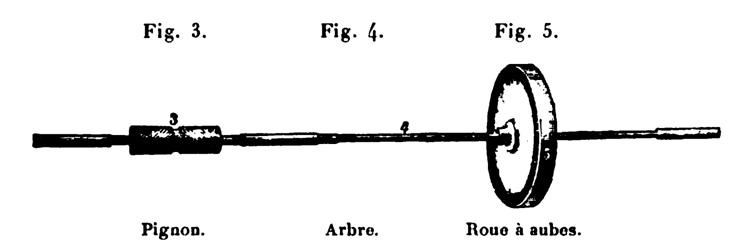


Fig. 3. Pignon. Fig. 4. Arbre. Fig. 5. Roue à aubes.

cette énergie cinétique dans un mécanisme semblable aux turbines hydrauliques.

Or, comme on peut faire rendre aux turbines jusqu'à 80 pour 100 du travail dû à la chute de l'eau motrice, on pouvait espérer récupérer une plus grande fraction de l'énergie utilisable correspondant à la chute de température de la masse gazeuse.

Dans cet ordre d'idées, les premières solutions trouvées tenaient compte plus ou moins des conditions de fonctionnement des machines à vapeur ordinaires, appliquées à des moteurs rotatifs. Ainsi, la vapeur arrivait au moteur en pression et la détente s'opérait progressivement dans le moteur même. Ces solutions étaient par avance condamnées, les conditions d'étanchéité nécessaires

pour le bon fonctionnement de ces appareils marchant à pression, ne pouvant pas être remplies, ou plutôt, une fois réalisées, ne pouvant pas être maintenues.

Il faut reconnaître, toutefois, que ces solutions, condamnées par la pratique, avaient marqué un pas en avant dans la voie des perfectionnements. Un pas de plus, et un grand progrès était réalisé.

Ce pas a été franchi, il y a quelques années déjà, et la solution d'une étonnante simplicité est due à un ingénieur suédois, M. de Laval.

Fig. 6.

Chambre.

Fig. 7.



Régulateur.

M. de Laval a eu l'idée d'utiliser *la force vive seule* de la vapeur, dont le principal facteur est *la vitesse*, à cause de la faible densité du fluide détendu.

Le principe fondamental de sa turbine est que la vapeur à haute pression arrive entièrement détendue sur les aubes de la roue réceptrice. Cette détente s'effectue dans le trajet de la valve d'introduction à l'orifice du tube distributeur de vapeur. Dans ce trajet, elle a acquis une force vive, due à sa propre détente, et qui est précisément égale au travail qu'elle aurait fourni en se détendant graduellement derrière un piston.

Cette force vive est alors transmise aux aubes de la roue, comme celle de l'eau dans une turbine hydraulique.

La turbine de Laval est analogue à une turbine d'Euler à introduction partielle et à libre écoulement, ou libre déviation.

Elle se compose d'une roue à aubes (*fig.* 1), sur laquelle la vapeur complètement détendue est amenée par deux ou plusieurs

ajutages (*fig.* 2) dont l'axe est faiblement incliné sur le plan de la roue (*fig.* 2 *bis* et *fig.* 14). Les jets de vapeur pénètrent dans le récepteur en glissant le long des aubes en vertu de la vitesse relative et en leur communiquant la force vive de la vapeur.

Fig. 8 à 12.

Détails du régulateur.

Cette vapeur sort sur la face opposée avec une vitesse absolue que l'on cherche à rendre la plus faible possible par un tracé approprié des aubes.

Fig. 13.

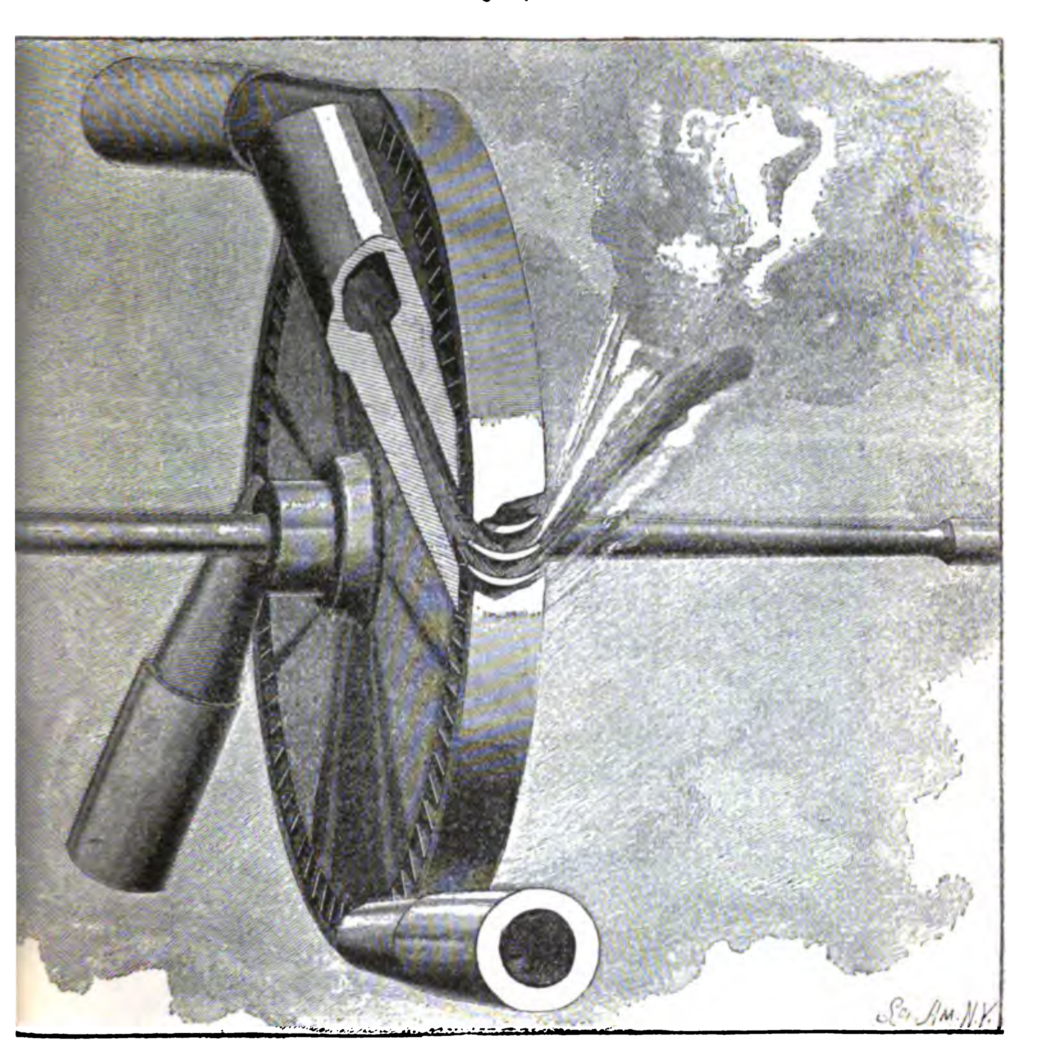


Engrenage.

Le corps de la turbine est monté sur un axe en acier (*fig.* 4), qui repose sur deux coussinets à ses extrémités, et tout l'ensemble tourne dans une chambre (*fig.* 6), où sont aménagées des ouvertures *a* dans lesquelles viennent se fixer les ajutages distributeurs. A une extrémité de l'arbre se trouve le régulateur (*fig.* 7-12) qui agit par un levier sur une soupape équilibrée. Un train d'engrenage (*fig.* 13) complète l'ensemble du moteur et réduit la vitesse de la turbine.

Les *fig.* 15 et 16 représentent les coupes de la turbine, *fig.* 17 l'ensemble et *fig.* 18 et 19 quelques-unes de ses applications.

Fig. 14.

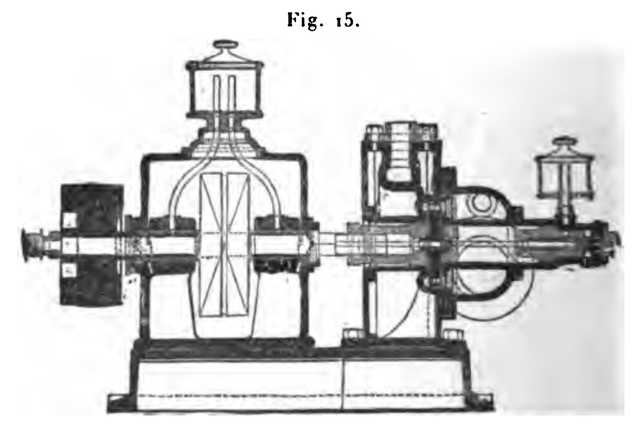


Détail de l'arrivée de vapeur.

La vapeur s'écoulant dans l'air sous pression par un orifice de petite section prend des vitesses considérables qui atteignent 775^{m}

par seconde à la pression de 6 atmosphères à la chaudière et 913^m à celle de 12 atmosphères. Ces vitesses sont encore notablement accrues quand le second milieu, où s'écoule le fluide, a une pression

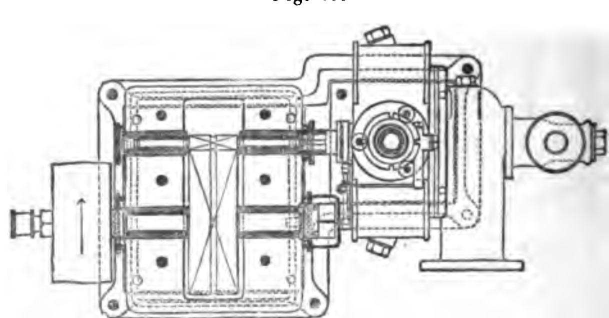
Fig. 15.



Coupe longitudinale de la turbine.

moindre que 1 atmosphère. Par exemple, de la vapeur à 6 atmosphères s'écoulant dans un condenseur où règne une pression absolue de $0^{atm},1$ acquiert une vitesse de 1120^m. La vitesse de la

Fig. 16.



Coupe horizontale de la turbine.

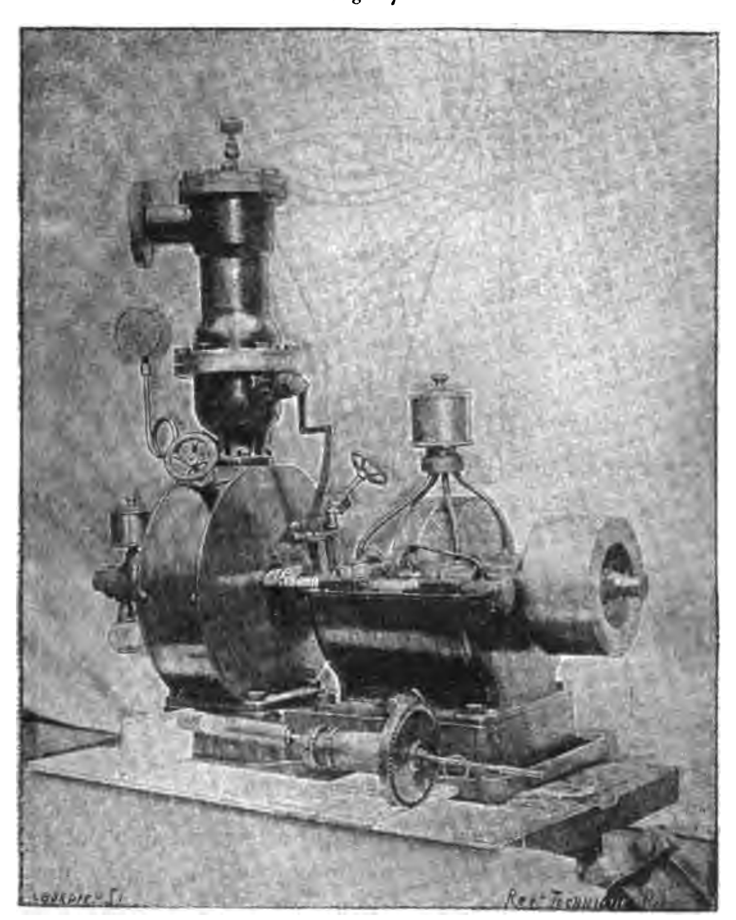
vapeur à la sortie des conduits distributeurs étant énorme, il en sera de même de la vitesse de rotation de la roue réceptrice, laquelle tourne de 15000 à 30000 tours par minute, avec des vitesses linéaires variant entre 175^m et 350^m par seconde.

Un travail considérable pourra donc être transmis à l'arbre de

la roue avec des organes de dimensions extrêmement faibles, transmettant des efforts insignifiants.

Pour une turbine de 10^{chx}, le disque n'a que 12^{cm} de diamètre, lequel est de 30^{cm} pour une turbine de 100^{chx}. L'arbre de 10^{chx} dans l'endroit le plus faible n'a que $4^{mm},5$ de diamètre.

Fig. 17.

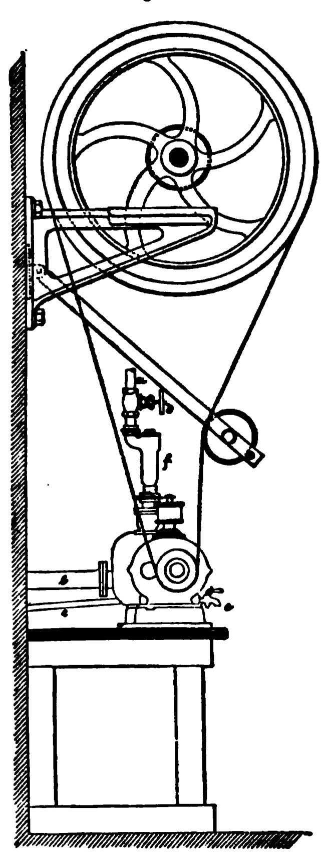


Vue d'ensemble d'une turbine.

Foucault, dans un de ses Mémoires, déclarait qu'une turbine de 50^{cm} de diamètre, alimentée de vapeur à 5^{kg} de pression, pourrait développer une puissance de 200^{chx}, à raison de 100 tours à la se-

conde. De Laval a réalisé la prévision de Foucault. Une turbine de 50^{cm} de diamètre, à 8^{kg} de pression et 260 tours à la seconde, développe 300^{chx}!

Fig. 18.

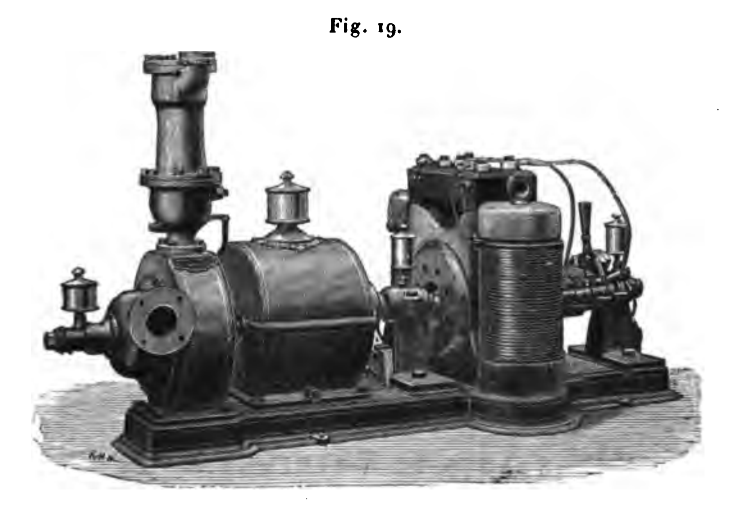


Turbine actionnant un atelier.

Avec ces vitesses considérables qui atteignent 350^{m} et 400^{m} à la périphérie, les efforts dus à la force centrifuge sont énormes. 1^{gr} placé à la périphérie d'un disque de 16^{cm} de diamètre tournant à 24000 tours est sollicité par une force égale à 50^{kg}. D'un autre côté, le centrage de la roue, si parfait qu'il soit, ne peut pas être absolu ; avec des arbres rigides, on finirait par user les coussinets en très peu de temps. Quelque précaution qu'on prenne dans la fabrication de la roue, il est impossible d'obtenir que son centre de

gravité vienne coïncider avec l'axe géométrique de l'arbre et que son plan de symétrie lui soit perpendiculaire; de ce chef, on pourrait craindre, avec raison, des échauffements dans les coussinets et même la rupture de l'arbre. M. de Laval a résolu cette difficulté d'une façon très ingénieuse et avec le plus grand succès en utilisant les propriétés gyrostatiques des corps. Il a reconnu théoriquement, et l'expérience lui a donné raison, que le centre de gravité de la roue tend à venir se placer de lui-même sur l'axe véritable de rotation, l'arbre se déformant de la quantité nécessaire pour lui permettre cette nouvelle orientation.

Fig. 19.



Vue d'ensemble d'une turbine accouplé directement à une dynamo.

On sait que l'équilibre dynamique d'un corps en rotation est d'autant plus stable que la vitesse est plus grande et l'on comprend que, suivant la vitesse, l'arbre peut prendre des mouvements vibratoires différents. Comme l'arbre est très flexible, il ne peut transmettre aux paliers que les efforts très faibles nécessaires pour le fléchir de la quantité voulue, ce qui explique que les vibrations transmises à la masse sont insignifiantes.

En résumé, ce qui caractérise cette turbine, c'est *que la vapeur n'y agit que par sa force vive,* complètement détendue et arrivant dans l'appareil à la pression du milieu ambiant. De là de multiples avantages : simplicité de construction, suppression de

condensation, rendement toujours constant, grâce à un jeu de plus de 2^{mm} entre le disque et la chambre dans laquelle tourne celui-ci, consommation de vapeur très réduite. Pour les petits moteurs, elle est de 23^{kg} par cheval-heure effectif dans le cas d'échappement à l'air libre et de 16^{kg} dans le cas d'échappement au condenseur, avec 6^{kg} de pression à la chaudière, et pour les moteurs de 50 chevaux et au-dessus, cette *consommation* tombe respectivement à 16^{kg} et 9^{kg}, *avec* 8^{kg} *de pression à la chaudière.* Donc, pas d'étanchéité; pas de surpression entre le distributeur et le récepteur; la vapeur sort sans vitesse, sans brouillard; *consommation de vapeur égale à celle des meilleures machines compound;* aucune surveillance nécessaire; faibles résistances passives; faible poids; encombrement très réduit; démontage et visite rapides; enfin, absence de trépidation.

Voilà, aussi succinctement que possible, ce qu'est la turbine de Laval et quels sont ses principaux avantages. Il me reste seulement à ajouter que la Société française de Laval, qui vient de se former, a confié la construction de ses machines à la Maison Breguet, qui, sous la direction de son chef distingué, M. l'Ingénieur G. Sciama, y trouvera une nouvelle occasion de justifier sa vieille renommée.

SÉANCE DU 6 AVRIL 1894.

PRÉSIDENCE DE M. CAILLETET.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 16 mars est lu et adopté.

Est élu membre de la Société :

M. MÉTRAL (Pierre), Agrégé des Sciences physiques, Professeur à l'École Colbert, à Paris.

M. le PRÉSIDENT annonce la perte douloureuse que la Société de Physique a faite dans la personne de M. *G. Salet,* maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Paris.

M. CAILLETET, Vice-Président, en l'absence du Président, remercie en ces termes les personnes qui ont pris part à l'Exposition annuelle :

MESSIEURS,

J'avais espéré que notre cher Président viendrait nous rendre compte, ce soir, des résultats de nos dernières séances de Pâques et qu'il adresserait les remercîments de notre Société aux nombreux inventeurs et savants qui ont bien voulu concourir à l'éclat de notre dernière Exposition.

L'absence de M. Joubert, tout en m'imposant la tâche de le remplacer aujourd'hui, me permet, du moins, de vous rappeler tous les services qu'il a depuis si longtemps rendus à la Science et à notre Société, et je suis heureux de l'occasion qui s'offre à moi de rendre ici un public hommage à notre éminent confrère. J'éprouve également une vive satisfaction à rappeler le dévouement que notre Secrétaire général M. Pellat a constamment apporté à la Société de Physique : c'est à son activité infatigable qu'est dû, en grande partie, le succès de nos séances et de nos Expositions annuelles.

En lui adressant, ainsi qu'à son intelligent collaborateur M. Sandoz, les remercîments et les félicitations qui leur sont dus, je crois être l'interprète des sentiments de tous.

Ainsi que vous le savez, Messieurs, les membres de la Société de Physique se réunissent chaque année à Paris, à l'époque de Pâques, et cette année plus que jamais, grâce à la libéralité des Compagnies de chemins de fer, nos nombreux confrères et amis de province sont venus assister à nos séances, visiter les ateliers obligeamment ouverts aux membres de la Société et admirer dans notre Exposition, les inventions qui ont le plus attiré l'attention des savants pendant le cours de la dernière année.

L'éclairage électrique de l'hôtel et de nos salles a été des plus brillants, grâce à la Société Cance, qui comme toujours a bien voulu nous prêter son concours aussi habile que désintéressé.

Les globes diffuseurs de MM. Psaroudaki et Blondel ont été aussi très remarqués.

Dans le vestibule qui précède les salles d'Exposition, la turbine à vapeur de M. de Laval, présentée par M. Sosnowski, appelait l'attention des visiteurs et tous ont été frappés de l'ingénieuse nouveauté de son dispositif, de son extrême vitesse, et de la perfection de sa construction. On a aussi examiné avec un vif intérêt l'appareil de M. Violle, destiné à reproduire les projections intermittentes des geysers et le moteur à pétrole système Daimler construit par MM. Panard et Levassor.

Dans les salles étaient disposés, par les soins de M. Aylmer, les voltamètres multicellulaires et les nouveaux ampèremètres de Lord Kelvin, un nouveau compteur d'énergie électrique de M. Déjardin, les mesureurs portatifs de résistances à miroir et un ohmmètre de M. Mergier, présentés par M. Gaiffe, le banc d'Optique pour l'étude de la vision dû à notre sympathique agent M. Sandoz, ainsi que les petits moteurs et les petits dynamos de M. Cadiot, les appareils électriques de M. Trouvé et le cinégraphe de M. Clémentitch.

Les appareils de MM. de Kowalski, Pellat, Chappuis, Maréchal, Rigollot et Laussedat exposés par M. Ducretet et Lejeune, les habiles constructeurs connus de tous les savants, ont été de nouveau très étudiés, ainsi qu'un compteur d'énergie électrique de MM. Meylan et Rechniewski construit par M. Wuilleumier.

M. A. Broca nous a présenté un Photomètre binoculaire. M. Gouy nous a montré une expérience fort intéressante sur la vision des objets opaques au moyen des rayons diffractés. M. Jobin nous a présenté l'ophtalmomètre Javal nouvellement modifié et M. M. de Thierry le monochromatoscope.

M. V. Chabaud exposait toute une série d'appareils divers : électromètre modifié de M. Lippmann, appareils en diélectrine de M. Hurmuzescu, thermomètre à toluène pour basses températures, manomètres de M. Villard, appareils de M. Varenne pour les distillations fractionnées, hygromètres de M. Bichat. M. Démichel nous a montré l'appareil de MM. Meslans et Frère pour prendre la densité des gaz et quelques autres appareils de mesure.

M. J. Carpentier, dont la science et l'esprit inventif sont si appréciés de tous, présentait des condensateurs en mica de M. Bouty, une photo-jumelle à répétition, un appareil de M. le général Sebert pour la détermination de la rapidité des plaques photographiques.

L'exposition de M. J. Richard se présentait avec son éclat accoutumé. On distinguait surtout le météorographe construit pour l'observatoire du mont Blanc. L'anémoscope électrique, la sonde marine de M. Favé, le cinémographe instantané, ainsi que divers ampèremètres et voltmètres enregistreurs. Près de là se trouvaient les machines électrostatiques de M. Bonetti, le four à récupération de M. Bigot, les stérilisateurs et les thermo-régulateurs construits par M. Lequeux, les pompes à mercure de M. Berlemont, les étuves à stérilisation de M. Brenot, les pyrosoudeurs de M. Périer, un appareil à épuisement continu de M. Etaix et un densimètre à cadran de MM. A. Pillon et J. Velter.

Les spécimens de photographies du fond de l'œil de M. le Dr Guilloz et les franges d'interférences de M. Meslin présentaient un intérêt particulier; ainsi qu'un pendule pour la mesure des durées de pose en photographie de M. le capitaine Colson et un théodolite construit par M. Echassoux destiné aux études photographiques.

La Société française de Photographie avait aussi exposé une série d'appareils d'un haut intérêt; tous les visiteurs remarquaient également les belles photographies de nuages obtenues par M. G. Raymond.

M. le Dr Régnard avait envoyé un appareil destiné à la projection des corps opaques placés sur un plan horizontal, M. Londe un nouveau photochronographe.

Les appareils d'une merveilleuse précision qui ont permis à M. Marey d'étudier et de fixer par la Photographie les diverses attitudes des êtres en mouvement ont été justement admirés.

On a également apprécié à leur haute valeur les instruments de M. le

Dr Hénocque, construits par M. Lutz, pour rechercher dans le sang les traces d'oxyde de carbone.

Le modèle de chemin de fer exposé par M. Pellat fait comprendre à merveille comment les accidents de la voie ferrée peuvent être facilement évités, grâce aux très ingénieux dispositifs qu'il a réalisés

Je ne peux passer sous silence les nombreux appareils construits par M. Ph. Pellin, pour MM. Mascart et Cornu, non plus que l'exposition de M. Werlein, cet artiste dont nous connaissons tous le talent et le désintéressement.

Vous ne me pardonneriez pas, Messieurs, d'omettre dans cette analyse les belles projections, faites par M. Molteni, des photographies en couleur de M. Lippmann, qui nous avaient été confiées par MM. Lumière. Vous avez éprouvé sans doute, en les voyant pour la première fois, l'impression profonde que j'ai ressentie moi-même. C'est, en effet, un de ces spectacles qu'on n'oublie pas et qui, à l'égal du phonographe et du téléphone, remplit l'esprit d'étonnement.

La visite que les membres de la Société ont faite à Saint-Denis à l'usine de traction électrique et de traction système Serpollet, de la Compagnie des Tramways-Nord, sur l'invitation du directeur M. Georges Broca, a vivement intéressé nos confrères et tous ont emporté les meilleurs souvenirs du gracieux accueil que leur a réservé l'Administration de cette Compagnie. Les communications, qui avaient lieu ordinairement le soir, ont été tenues dans l'après-midi; elles ont réuni un grand nombre d'auditeurs qui ont applaudi MM. Broca, Meslin et Sosnowski.

J'aurais désiré pouvoir vous présenter ici des explications assez détaillées pour mettre en relief le mérite de chacun de nos exposants.

Les limites étroites de cette analyse m'obligent à me restreindre au risque d'être incomplet.

Nous avons l'espoir que, l'année prochaine, nos séances de Pâques, si utiles à notre Société, offriront le même intérêt scientifique que leurs devancières, et que les inventeurs et savants voudront bien nous continuer leur précieuse collaboration.

M. Guillaume montre, par quelques exemples, combien la notion de l'énergie existant comme grandeur simple et indépendante a fait de progrès depuis quelques années; les expériences journalières et le simple usage de nos sens font intervenir l'énergie au moins autant que la matière.

L'Auteur aborde ensuite la question des forces exercées par l'énergie vibratoire du milieu sur tout corps qui l'absorbe ou la réfléchit. L'existence d'une pression due aux radiations a déjà été démontrée par Maxwell, en partant de la théorie électromagnétique de la lumière; M. Bartoli a calculé de même cette pression en fondant sa démonstration sur la Thermodynamique. M. Guillaume donne une démonstration nouvelle et plus simple du même fait; il explique ensuite la cause intime du phénomène par le principe de Doppler : lorsqu'un miroir s'avance vers le corps rayonnant,

il lui renvoie une radiation ayant le caractère de celle qui serait émise à une température plus élevée.

L'application du même raisonnement au cas des ondes sonores vérifie immédiatement la formule connue des pressions dues au mouvement d'un plan dans l'air.

M. G. Roux présente au nom de M. Aylmer trois appareils industriels de Lord Kelvin : ce sont le voltmètre électrostatique multicellulaire transportable, le voltmètre multicellulaire électrostatique pour tableau de distribution et l'ampèremètre électromagnétique. Le voltmètre électrostatique multicellulaire de Lord Kelvin se compose de deux séries de 10 quadrants fixes en métal reliés ensemble à une borne extérieure isolée et d'un groupe de 10 aiguilles en forme de lemniscate en aluminium montées sur un arbre de même métal fixé à l'extrémité d'un fil en alliage de platine-iridium soudé à l'autre bout à un chapeau tournant à frottement sur un tube de laiton protégeant le fil de suspension. L'extrémité supérieure de l'arbre portant les aiguilles porte en outre un ressort elliptique qui vient butter contre la base du tube protecteur du fil de suspension lorsqu'on élève cet arbre au moyen d'un petit plateau situé à une petite distance de son extrémité inférieure et qui est élevé ou abaissé au moyen d'une vis à tête moletée placée extérieurement au centre de la base de l'appareil. L'arbre porte aussi une aiguille équilibrée en aluminium qui se déplace au-dessus d'un cadran divisé et d'un amortisseur constitué par un cercle de laiton que l'on peut élever ou abaisser au moyen d'une came commandée par une manette extérieure à l'appareil. La cage de l'appareil est entièrement métallique et est reliée au cadran divisé, à l'aiguille et à deux plaques de laiton verticales qui limitent la course de l'aiguille et qui agissent aussi comme armature répulsive. Trois vis calantes et un niveau permettent de régler l'appareil. Cet instrument n'étant influencé ni par les phénomènes atmosphériques, ni par les phénomènes extérieurs, ses indications restent toujours exactes. Il peut être déplacé et secoué sans aucun inconvénient après avoir calé la suspension comme il a été dit ci-dessus. Plusieurs types ont été établis; le plus industriel est celui donnant de 60 à 240 volts dont les lectures les plus faciles vont de 70 à 130 volts.

Le voltmètre pour tableaux de distribution ne diffère du premier que par quelques détails; la graduation est faite sur une portion de cylindre dont l'axe coïncide avec la suspension; l'aiguille est recourbée et se déplace devant la graduation. L'amortisseur est constitué par un disque de laiton suspendu par un crochet à l'aiguille et se déplaçant dans de l'huile lourde. L'appareil est très sensiblement apériodique.

L'ampèremètre industriel de Lord Kelvin est destiné aux tableaux de distribution et se compose d'un solénoïde à axe vertical composé de pièces de cuivre en U à branches très serrées séparées les unes des autres par une feuille de mica et reliées en tension au moyen de plaques de cuivre inclinées d'environ 45°. Ces plaques de cuivre servent en même temps à

accroître la surface de rayonnement du système et facilitent son refroidissement.

Le système mobile se compose d'une tige de fer très doux terminée par une tige de laiton portant un poids. Cette tige porte un étrier horizontal reposant par ses arêtes vives dans des trous percés dans un cadre en platinoïde portant une aiguille et suspendu par deux crochets fixes en cuivre rouge. Un contrepoids suspendu à l'extrémité d'un bras de levier détermine la position d'équilibre du système.

Le solénoïde agit sur la tige de fer par succession, et le mouvement de cette tige est assuré suivant la verticale par la masse en laiton qui la termine; un petit amortisseur à glycérine arrête les oscillations.

Cet appareil d'une grande simplicité n'est pratiquement pas influencé par les actions extérieures et les câbles voisins traversés par des courants. Il ne nécessite pas d'autre réglage que celui de la position verticale qui est obtenue lorsque l'aiguille est au zéro à circuit ouvert.

Applications du principe de Doppler à l'énergie des radiations.

Par M. Ch.-Ed. Guillaume.

Le principe de Doppler (1) peut être envisagé au point de vue simplement cinématique, ou au point de vue plus complet de l'énergétique; on s'est presque exclusivement occupé jusqu'ici de sa forme cinématique, mais on peut tirer des résultats intéressants

(1) Il serait imprudent d'affirmer qu'aucun physicien, avant Doppler, ait eu connaissance de l'important principe qu'il a formulé; il est difficile, cependant, de concevoir comment Biot a pu écrire ce qui suit, sans en avoir au moins l'intuition :

«... Ce que nous appelons lumière n'est qu'un élément particulier de la radiation totale émanée des corps que nous voyons lumineux. D'après les observations que M. Arago a faites sur les rayons venant des étoiles situées dans l'écliptique, et vers lesquelles la terre marche, ou dont elle s'éloigne, une altération de $\frac{1}{10000}$ en plus ou en moins, dans leur vitesse propre, suffit pour leur ôter la faculté de produire la vision dans nos yeux; et la même altération de vitesse transporte cette faculté à d'autres rayons qui ne la possédaient pas auparavant.» (*C. R.*, t. IX, p. 725; 1839.) Le phénomène que décrit Biot ne pourrait être expliqué par le principe de Doppler que si l'on admettait des vitesses très supérieures à celles que l'on observe dans les astres; mais il ne faut pas oublier que Doppler lui-même, qui avait compris la grande importance de son principe, n'était pas beaucoup plus près de la vérité dans ses applications.

de sa combinaison avec les principes de la science générale de l'énergie.

Considérons un plan indéfini et uniforme, placé en regard d'un miroir qui lui est parallèle; ce dernier renverra à la première surface toute l'énergie qui en émane, et la température de celle-ci restera constante; mais supposons que le miroir s'avance vers la surface rayonnante; le temps employé par les radiations pour accomplir leur trajet diminuera, et, pendant le mouvement du miroir, le corps recevra plus d'énergie qu'il n'en aura émis; sa température s'élèvera donc par le fait de sa propre radiation. Ce phénomène paradoxal s'explique si l'on suppose que le miroir engendre un travail en se déplaçant, et qu'il éprouve une poussée de la part des radiations. Maxwell a déjà donné l'expression de cette poussée, en partant de la théorie électromagnétique des radiations. M. Boltzmann et M. Bartoli ont été conduits au même résultat par la Thermodynamique pure.

On trouve immédiatement la valeur de cette poussée en égalant la quantité d'énergie reçue par le corps rayonnant au produit du déplacement du miroir par l'effort cherché.

Si le miroir ne réfléchit qu'une fraction a de la radiation, l'expression de la poussée est, tout à fait généralement,

$$F = \frac{P(1 + a)}{v},$$

P désignant la puissance de la radiation, v sa vitesse de propagation.

Le principe de Doppler permet de se rendre compte immédiatement de la cause intime du phénomène.

Considérons, pour fixer les idées, un corps s'approchant avec une vitesse V d'un observateur immobile. Un mouvement vibratoire de longueur λ, émané du corps rayonnant, est perçu comme un mouvement dont la longueur d'onde est

$$\lambda' = \lambda \frac{v - V}{v}.$$

Posons $\frac{v}{v - V} = r$, d'où

$$\lambda' = \frac{\lambda}{r}.$$

L'ensemble de la radiation d'un corps, que nous supposerons en repos, est donné par une certaine fonction de la longueur d'onde et de la température, que nous écrirons $f(\theta, \lambda)$. Lorsque le corps se déplace, cette fonction se modifie, chaque radiation élémentaire étant transformée en une radiation de longueur d'onde moindre, dans le rapport de r à 1. Nous obtiendrons donc la forme de la radiation modifiée en remplaçant, dans la fonction f, λ par $\lambda' r$. La courbe qui représente cette fonction se rassemblera davantage vers l'origine, et prendra le caractère d'une radiation émise à une température plus élevée. Mais ce n'est pas tout; la puissance d'une radiation augmente proportionnellement au carré du rapport de raccourcissement des ondes (¹), de telle sorte que la puissance de la radiation sera donnée par

$$r^2 f(\theta, \lambda' r);$$

nous aurions été conduits à la même expression en remarquant que l'énergie reçue dans un temps donné augmente proportionnellement à r, tandis que l'aire de la courbe donnée par la fonction $f(\theta, \lambda' r)$ est r fois plus petite que celle de la courbe $f(\theta, \lambda)$. Nous pouvons donner à cette transformation une forme précise, en adoptant, pour la fonction f, une formule déterminée.

La seule qui, à ma connaissance, repose sur des principes nettement définis, est celle de M. Wladimir Michelson (²). Elle a été établie en considérant la probabilité des mouvements moléculaires, et comporte une importante vérification (³). Cette formule est la suivante :

$$W_\lambda = B\theta^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{c}{\theta\lambda^2}} \lambda^{-6}.$$

En remplaçant λ par $\lambda' r$, et en multipliant par r, il vient

$$W_{\lambda',\theta} = B\theta^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{c}{\theta r^2 \lambda'^2}} \lambda^{-6} r^{-4}.$$

(¹) Puisque l'énergie d'un mouvement vibratoire est proportionnelle à $ma^2\lambda^{-2}$, m étant la masse en mouvement, a l'amplitude du mouvement.

(²) W. Michelson, *Essai théorique sur la distribution de l'énergie dans les spectres des solides* (*Journal de Physique*, oct. 1887).

(³) Les considérations purement théoriques développées par M. Michelson conduisent à la relation $A = K\sqrt{T}$, T désignant la température du corps rayonnant, A l'abscisse de l'ordonnée maxima de la courbe représentant le spectre normal de la radiation considérée. La forme définitive donnée par M. Michelson à sa loi générale, repose sur la loi expérimentale de Stefan.

Cette formule nous donne la radiation du corps considéré, lorsqu'il se déplace vers l'observateur.

Proposons-nous de chercher dans quelles conditions nous pourrons obtenir le même ensemble de radiations par un corps en repos. Nous devrons conserver λ et modifier la température. Or, si nous remplaçons, dans l'exposant de e, $r^2\theta$ par θ', l'exponentielle correspondra à celle qui convient à un corps dont la température est θ'.

Faisant la même substitution dans le reste de la formule, il vient

$$B\theta^{\frac{3}{2}}\lambda'^{-6}r^{-4} = B\theta'^{\frac{3}{2}}\lambda'^{-6}r^{-7},$$

et la loi de l'émission sera

$$W_{\lambda',\theta'} = B\theta'^{\frac{3}{2}}e^{-\frac{c}{\theta'\lambda'^2}}\lambda'^{-6}r^{-7},$$

tandis que, si nous avions simplement élevé la température du corps considéré dans le rapport de 1 à r^2, sans modifier le pouvoir émissif, la radiation aurait été représentée par la formule

$$W_{\lambda,\theta'} = B\theta'^{\frac{3}{2}}e^{-\frac{c}{\theta'\lambda^2}}\lambda^{-6}.$$

On en conclut que la radiation d'un corps en mouvement peut être remplacée par celle d'un corps en repos, dont la température est plus élevée dans le rapport de 1 à r^2, mais dont le pouvoir émissif est r^7 fois plus faible; néanmoins, l'énergie reçue est r fois plus considérable, puisque, d'après la loi de Stefan, sur laquelle repose la formule de M. Michelson, l'émission totale est proportionnelle à la quatrième puissance de la température.

La transformation que nous venons de faire permet, en outre, de passer directement d'une courbe correspondant à une température donnée à celle qui convient à une température différente.

Si nous avons tracé la courbe correspondant à la température θ, nous obtiendrons celle qui convient à θ', en réduisant d'abord toutes les abscisses dans le rapport $\sqrt{\frac{\theta'}{\theta}}$, cette quantité étant l'analogue de $\frac{r}{1}$. Les ordonnées devront ensuite être multipliées

par r^9 puisque la multiplication par r nous ramène à la même aire totale, et celle-ci doit être multipliée par $\left(\frac{\theta'}{\theta}\right)^4$.

Cette variation du pouvoir émissif des corps en mouvement, qui se déduit immédiatement des formules, correspond sans doute à une modification dans les réactions de la matière et de l'éther.

Vérification des formules précédentes. — La relation qui exprime la pression exercée sur un plan par l'énergie ambiante qui est absorbée ou réfléchie par ce plan se vérifie dans un cas très simple, auquel on peut appliquer le calcul élémentaire. La nature de l'énergie n'ayant pas été définie dans la démonstration, le théorème subsiste dans le cas des ondes sonores, à la condition, toutefois, que l'énergie cinétique du gaz ne se transforme ni en totalité, ni en partie en une autre forme de l'énergie, la forme rayonnante par exemple.

Considérons des ondes sonores de puissance P, qui s'éteignent sur un plan. Soit v leur vitesse de propagation ; la pression qu'elles exercent sur le plan est $\frac{P}{v}$.

Si l'onde est entraînée par un mouvement de translation du gaz, la pression due à la vibration s'ajoute à celle qui résulterait de l'attaque du plan par le gaz possédant une vitesse constante, et, en raison de la loi du carré de la vitesse, la pression moyenne est toujours augmentée d'une certaine quantité qui doit être égale à celle que l'on trouve en appliquant la formule générale.

L'effort qui s'exerce sur un plan de surface S, par l'action d'un gaz animé d'une vitesse μ, est égal à $\gamma S \mu^2$, γ étant un coefficient dont la valeur dépend de la densité du gaz, et de son mode d'écoulement après le contact avec le plan.

Si nous supposons que la vitesse μ se compose d'un terme constant u, et d'une fonction périodique, l'effort moyen supporté par le plan sera

$$\gamma S(u^2 + 2\pi^2 a^2 n^2),$$

a étant l'amplitude de la vibration, n sa fréquence.

Le terme $\gamma S u^2$ est dû au mouvement d'ensemble de l'air, tandis que le facteur additionnel $2\pi^2 \gamma S a^2 n^2$ provient du mouvement périodique.

Nous savons, d'autre part, que l'énergie totale d'un volume Q d'un corps de densité δ soumis à un mouvement vibratoire est

$$2\pi^2\delta Q a^2 n^2.$$

Si cette vibration s'éteint sur le plan, l'effort qu'elle exerce sera

$$\frac{P}{v} = \frac{2\pi^2\delta Q a^2 n^2}{v}.$$

Or, le volume Q contenant la quantité d'énergie qui frappe la surface S dans l'unité de temps est égal à Sv; donc,

$$\frac{P}{v} = 2\pi^2\delta S a^2 n^2.$$

Nous avons ainsi deux valeurs distinctes de la pression due à la vibration; ces valeurs sont égales si

$$\delta = \gamma.$$

Or on sait que, lorsqu'un courant fluide frappe normalement un plan et s'écoule tangentiellement à ce plan, le coefficient γ est égal à la masse spécifique du fluide.

La formule générale, trouvée en partant des principes de l'énergétique, est donc vérifiée dans ce cas particulier.

SÉANCE DU 20 AVRIL 1894.

PRÉSIDENCE DE M. DE ROMILLY.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 6 avril est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. BELLE (Gaston), Conseiller d'Ambassade à Paris.
BORDIER (Dr), Préparateur de Physique à la Faculté de Médecine de Bordeaux.
GRUAU (Félix), Professeur au Lycée de Troyes.
GUILLOZ (Dr Th.), Chef des Travaux de Physique médicale à la Faculté de Médecine de Nancy.
NOLOT, Professeur au Lycée de Roanne.

M. le **Président** annonce la perte douloureuse que la Société de Physique a faite dans la personne de M. *Paul Jablochkoff*, décédé le 6 avril à Saratow (Russie).

Le **Secrétaire général** annonce l'envoi de deux Notes de M. Delaurier, intitulées : 1° *Navigation aérienne pyrotechnique sans ballon;* 2° *Sur les propriétés magnétiques du fer à diverses températures.*

M. **Curie** a étudié les propriétés magnétiques du fer doux à diverses températures depuis 20° jusqu'à 1350° et pour des champs variant de 25 à 1350 unités. Il a pu tracer pour diverses températures les courbes qui relient l'intensité d'aimantation I à l'intensité du champ. Lorsque le champ croît de 0 à 1300, les courbes s'écartent peu l'une de l'autre, sans toutefois se confondre pendant une partie de leur tracé, puis ces courbes se séparent franchement. On peut imaginer une courbe limite qui serait celle vers laquelle tendent les autres courbes lorsque la température absolue tend vers zéro. La courbe d'une température quelconque s'écarterait peu de la courbe limite sur une première portion de son tracé d'autant plus long que la température serait plus basse. A partir de 756° et jusqu'à 1375° les courbes ne sont plus que des droites passant par l'origine, c'est-à-dire que le coefficient d'aimantation est constant quel que soit le champ, et le fer se comporte comme un corps faiblement magnétique. M. Curie s'est attaché à préciser la façon dont se fait la transition progressive de l'état ferro-magnétique à l'état faiblement magnétique.

M. Curie a également tracé les courbes donnant pour un champ constant la liaison de l'intensité d'aimantation à la température. D'une manière générale, l'intensité d'aimantation reste d'abord constante quand la température s'élève puis décroît de plus en plus vite et la chute atteint son maximum de vitesse vers 745°; c'est la *température de transformation magnétique du fer*, expression commode, mais qui a une signification un peu vague. Au delà de 750° la vitesse de chute de l'aimantation avec la température va en diminuant; mais la vitesse relative de chute $\frac{-1}{I}\frac{dI}{dt}$ est toujours considérable. L'intensité d'aimantation diminue de la moitié de sa valeur, d'abord pour quelques degrés, puis pour 20° ou 30° d'élévation de la température. Vers 860° la courbe construite en prenant en ordonnées les logarithmes de l'intensité d'aimantation et en abscisses les températures a un changement d'allure très net. De 950° à 1280° l'intensité d'aimantation ne diminue plus que lentement. A 1280° l'intensité d'aimantation augmente brusquement de la moitié de sa valeur, puis de 1280° à 1365° elle se remet à diminuer quand la température augmente.

M. **Le Chatelier** insiste sur l'intérêt que présentent les recherches de M. Curie au point de vue de la détermination des points de transformation du fer, question d'une importance capitale pour la métallurgie et qui a été

dans ces dernières années l'objet de nombreux travaux. Elles lui semblent très nettement confirmer l'existence des trois points de transformation allotropique du fer déjà signalés :

Le point de 750° (ar^2 de M. Osmond) qui correspond à la perte presque totale des propriétés magnétiques, auquel j'avais attribué antérieurement la température de 760° en m'appuyant sur les expériences de M. Hopkinson;

Le point de 860° (ar^3 de M. Osmond) auquel j'avais attribué la température de 850° d'après des mesures de variation de la conductibilité électrique;

Le point de 1280° signalé par Ball qui lui avait attribué la température de 1300°, mais dont l'existence avait été contestée depuis par M. Osmond.

Ces diverses déterminations de température peuvent être considérées comme pratiquement identiques.

Toutes les transformations des corps solides étudiés jusqu'ici se produisent d'une façon brusque; il doit en être de même dans le cas du fer. Si la variation des propriétés magnétiques semble se faire d'une façon continue, cela peut tenir à ce qu'au voisinage du point de transformation les changements d'état ne se font qu'avec une lenteur extrême et souvent s'arrêtent à mi-chemin avant d'avoir atteint leur limite. Le changement du soufre octaédrique en soufre prismatique au voisinage du point de transformation demande des journées entières pour s'accomplir.

Le déplacement des points de transformation suivant l'intensité du champ magnétique, qui semble résulter bien nettement des expériences de M. Curie, pouvait être prévu; c'est une conséquence nécessaire des principes fondamentaux de la Thermodynamique. Le magnétisme, aussi bien que l'électricité, la chaleur et le travail influe sur l'état d'équilibre des systèmes chimiques, à condition cependant que la transformation entraine un changement des propriétés magnétiques du système. Le point de transformation de 750°, qui correspond à une faible absorption de chaleur et un grand changement des propriétés magnétiques, doit être considérablement influencé. C'est le contraire pour le point de 860°. La relation numérique est en effet de même forme que celle des tensions de vapeur.

M. Curie fait observer qu'au point de vue des propriétés magnétiques la transformation de 1280° semble seule être brusque. A une même température on retrouve à peu près les mêmes valeurs pour le coefficient d'aimantation pendant la période d'échauffement et pendant celle de refroidissement. Les transformations de 860° et de 1280° semblent être des transformations allotropiques et donnent une allure particulièrement complexe aux phénomènes magnétiques du fer. La variation rapide des propriétés magnétiques du fer vers 750° est au contraire un phénomène normal; tout autre corps ferro-magnétique se comporte de même à une certaine température. On est frappé, en construisant ces courbes, de l'analogie qui existe entre les relations $f(\mathrm{I}, \mathrm{H}, \mathrm{T}) = 0$ pour les corps magnétiques et la relation $f(\mathrm{D}, p, \mathrm{T}) = 0$ relative à une masse fluide. A l'intensité d'ai-

mantation I correspond la densité D du fluide; à l'intensité du champ magnétique H correspond la pression p; la température T joue le même rôle dans les deux cas. Pour trouver l'analogue de la variation de l'intensité d'aimantation du fer avec la température vers 750° pour un champ constant supérieur à 25 unités, il faut considérer la variation de la densité d'un fluide avec la température sous une pression constante supérieure à la pression critique. Vers 750° la variation de l'intensité d'aimantation est d'autant plus rapide avec la température que l'intensité du champ est plus faible. On peut se demander si la variation serait brusque pour un champ suffisamment faible (phénomène analogue à la liquéfaction du fluide sous une pression inférieure à la pression critique); mais les phénomènes d'hystérésis magnétiques viennent singulièrement compliquer les résultats pour les champs faibles.

Sur la capacité électrique du mercure et les capacités de polarisation en général. — 1. M. Bouty a déjà entretenu la Société de ses recherches sur les capacités de polarisation [1]. Il rappelle que, d'après les expériences de M. Blondlot, parfaitement d'accord avec les siennes, la capacité d'une électrode, *évaluée par des expériences de charge,* est une fonction rapidement croissante de la force électromotrice.

En s'appuyant sur les principes de la Thermodynamique M. Lippmann a relié la notion des capacités de polarisation aux phénomènes électrocapillaires. Il admet que le phénomène de la polarisation du mercure en contact avec un électrolyte est réversible et, sans le secours d'aucune autre hypothèse, il démontre que *la capacité de l'unité de surface d'une électrode de mercure, à surface constante, est égale à la dérivée seconde changée de signe* $-\frac{d^2A}{de^2}$ *de la tension superficielle* A *par rapport à la force électromotrice de polarisation e de l'électrode.* M. Lippmann a calculé cette dérivée seconde d'après ses expériences sur le mercure en contact avec l'eau acidulée au $\frac{1}{10}$, et reconnu qu'on pouvait la considérer comme sensiblement indépendante de la force électromotrice de polarisation.

2. Pour lever la contradiction qui semblait exister entre les expériences directes sur l'accroissement de la capacité du platine avec la force électromotrice d'une part, et d'autre part la constance de la valeur théorique de la capacité du mercure déduite des phénomènes électrocapillaires, M. Bouty a d'abord repris le calcul de M. Lippmann, en cherchant à en pousser la précision au degré même de la précision des expériences. De $0^{Da},4$ à $1^{Da},4$ on peut considérer $-\frac{d^2A}{de^2}$ comme rigoureusement constant;

---

[1] Séance du 2 juin 1893.

sa valeur correspond à une capacité de 28^{mf},55 par centimètre carré. Au-dessous de 0^{Da},4 il y a une différence systématique sensible (due sans doute à quelque phénomène secondaire), mais elle indiquerait une variation de la capacité de sens contraire à celles qu'a fournies l'expérience.

M. Bouty a fait usage d'un électromètre spécial, dans lequel on mesurait les dépressions capillaires au lieu de les compenser par l'effet d'une pression, et il a trouvé une valeur de $-\frac{d^2A}{de^2}$, qui semble absolument constante de 0^{Da},05 à 1^{Da} : elle correspond à une capacité de 27^{mf},8 environ par centimètre carré, en conformité parfaite avec la valeur calculée d'après les expériences de M. Lippmann. Ajoutons, en passant, qu'à l'aide du même électromètre, M. Bouty a mesuré la capacité théorique du mercure au contact d'une eau acidulée très étendue (0^{gr},2 d'acide sulfurique anhydre par litre) : elle est presque identique à la précédente, mais l'eau distillée donne une capacité plus faible.

3. La contradiction signalée ci-dessus paraît donc bien réelle. M. Bouty a montré qu'elle tient à l'irréversibilité des phénomènes de la polarisation et qu'elle disparaît si, au lieu de mesurer des capacités apparentes de charge, on considère les capacités efficaces pour produire la décharge à travers une résistance métallique extérieure.

4. Soit, par exemple, le cas d'une électrode de platine en contact avec une liqueur neutre (azotate de soude) dans laquelle elle plonge depuis longtemps. La perte de polarisation en circuit ouvert est négligeable. Fermons le circuit sur une résistance R et soient p_0 la polarisation initiale, p_1 la polarisation au bout de l'unité du temps. La vitesse moyenne de dépolarisation est

$$\eta_1 = \frac{p_0 - p_1}{\frac{p_0 + p_1}{2}},$$

et la capacité moyenne efficace pour produire la décharge entre les polarisations p_0 et p_1 est

$$\mathfrak{C} = \frac{1}{R\eta_1}.$$

L'expérience montre que, dans des limites très larges :

1° $\mathfrak{C}$ est indépendant de la polarisation acquise;

2° Que sa valeur limite pour une durée de charge nulle produisant la polarisation initiale p_0 quelconque se confond avec la capacité initiale de charge C rapportée à une polarisation nulle.

Il en résulte, et c'est là le principal résultat de ce travail, que la capacité de polarisation du platine doit être considérée comme indépendante de la force électromotrice de polarisation. Sa valeur (17^{mf} environ par cen-

timètre carré pour le platine et l'azotate de soude à la température ordinaire) est du même ordre de grandeur que la capacité théorique du mercure calculée ci-dessus.

L'égalité limite des capacités de charge et de décharge prouve que le phénomène de la polarisation du platine est réversible à la limite pour une force électromotrice et une durée de charge infiniment petites. Il ne l'est pas en dehors de cette double condition. Par exemple, nous avons vu que les capacités apparentes de charge croissent avec la force électromotrice : c'est l'inverse qui se produit pour les capacités efficaces correspondant à une durée de fermeture de plus en plus grande du circuit de décharge.

5. Dans les expériences précédentes, toute l'électricité fournie au platine pendant la charge est récupérable pendant la décharge, mais d'après une autre loi. Il s'est formé des résidus à longue période dont la proportion, dans l'une des expériences de M. Bouty, était supérieure au quart de la charge totale. Une électrode de platine polarisée au contact d'une liqueur neutre est donc comparable non à un condensateur parfait, mais à un condensateur portant en dérivation une sorte d'accumulateur.

6. Le cas qui précède est le plus simple qui se présente dans la nature. On obtient un degré de complication de plus en ajoutant au sel neutre qui baigne l'électrode une petite quantité de chlorure de platine. Alors la totalité de l'électricité fournie pendant la charge cesse d'être récupérable, et l'électrode polarisée se comporte comme la superposition d'un condensateur, d'un accumulateur et d'un voltamètre à électrodes impolarisables.

7. Le platine récemment porté à l'incandescence, les métaux plus oxydables (mercure, cuivre, fer) présentent des capacités apparentes de charge énormes. De plus, leur dépolarisation spontanée en circuit ouvert est considérable et rend illusoire la recherche de leur capacité efficace de décharge, parce que les deux phénomènes se modifient l'un l'autre en se superposant. Ici la complication des phénomènes irréversibles devient pour ainsi dire inextricable.

8. Deux théories de la polarisation se trouvent en présence : l'une purement physique (c'est la théorie de la couche double de M. von Helmholtz), repose sur des bases certaines, mais fait abstraction des phénomènes irréversibles, dont le travail qui précède montre à la fois la complexité habituelle et l'importance relative. L'autre théorie, plus ancienne, cherche à expliquer la polarisation par de véritables modifications chimiques de la surface de l'électrode ou du liquide qui la baigne. Appuyée dans les dix ou quinze dernières années par des faits nombreux, étudiés notamment par MM. Berthelot, Bouty, Warburg, Meyer, etc., elle paraît s'imposer aujourd'hui comme un complément nécessaire de la théorie de la couche double. Il n'y a pas de polarisation sans la production préalable d'un courant à travers l'électrolyte; et les phénomènes irréversibles, qui ne paraissent

explicables qu'à la faveur d'une véritable électrolyse, commencent à se manifester pour les plus petites valeurs de la force électromotrice de polarisation.

M. Pierre Clémentitch de Engelmeyer présente un appareil qu'il a imaginé et qu'il appelle *Cinégraphe;* il a pour but de démontrer les différents cas de la composition des vitesses. Cet appareil sert, dans l'enseignement de la Mécanique élémentaire, à démontrer la loi du parallélogramme des vitesses, ainsi que la genèse cinématique de diverses courbes, par exemple de la parabole, comme trajectoire d'un corps lancé, de la sinusoïde comme trajectoire d'un corps en vibration, etc.

Sur les capacités de polarisation (1);

Par M. E. Bouty.

A. — Méthodes de mesure.

1. *Étude du courant de charge.* — Imaginons qu'on dirige à travers un voltamètre non polarisé un courant dont l'intensité connue I_0 est maintenue constante malgré les progrès de la polarisation. La quantité d'électricité Q qui traverse le voltamètre dans un temps t sera

$$Q = I_0 t;$$

et si l'on parvient à mesurer en fonction du temps la polarisation totale p produite, la capacité *apparente* moyenne du voltamètre pendant la charge sera égale à $\frac{Q}{p}$.

2. Pour réaliser au degré d'approximation nécessaire le cas idéal d'un courant d'intensité constante, il suffit d'introduire dans le circuit du voltamètre une force électromotrice cent fois plus grande, par exemple, que la valeur maximum de la polarisation p que l'on se propose d'atteindre, et de rendre la résistance totale très grande pour que l'intensité du courant soit très faible.

---

(1) Extrait d'un Mémoire plus étendu publié dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 7e série, t. III, p. 145; octobre 1894.

Soit r la résistance du voltamètre, qu'on peut, si l'on veut, faire très considérable. J'introduis dans le circuit une résistance métallique R, *toujours très grande,* et tout au moins de l'ordre de grandeur de r. On suppose la capacité électrostatique du circuit négligeable et son coefficient de self-induction assez faible pour que la période variable, considérée indépendamment de la polarisation, soit de très courte durée. Soit E la force électromotrice contenue dans le circuit. Au bout de quelques millièmes de seconde, l'intensité du courant est pratiquement égale à

$$I_0 = \frac{E}{R+r},$$

et la différence de potentiel ε des électrodes de l'auge atteint une valeur

$$\varepsilon_0 = r I_0 = \frac{rE}{R+r}.$$

On peut considérer ε_0 comme une valeur initiale, à partir de laquelle ε croît ensuite très lentement, en vertu de la polarisation, vers une limite $\mathcal{E}$, telle que la différence $\mathcal{E} - \varepsilon_0$ est toujours très petite par rapport à E.

3. On mesure à diverses époques t les différences de potentiel $\varepsilon - \varepsilon_0$. On en déduit, ainsi qu'il suit, les polarisations p correspondantes. Soit I l'intensité du courant au temps t; on a

$$\varepsilon_0 = rI, \quad = r\frac{E}{R+r},$$

$$\varepsilon = rI + p = r\frac{E-p}{R-r} + p.$$

Il en résulte

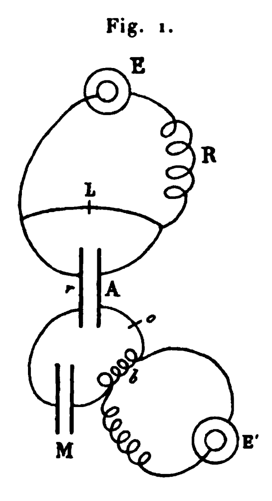
$$p = \frac{R+r}{R}(\varepsilon - \varepsilon_0). \tag{1}$$

4. Les durées t sont mesurées à l'aide du pendule interrupteur que j'ai précédemment décrit ([1]). Elles comprennent toujours un nombre entier d'oscillations du pendule.

([1]) *Ann. de Chim. et de Phys.*, 6e série, t. XXIV, p. 400, et t. XXVII, p. 64.

Pour mesurer $\varepsilon - \varepsilon_0$, je place en dérivation sur l'auge électrolytique A un condensateur M (microfarad ou subdivisions) de capacité négligeable par rapport à celle de l'auge (*fig.* 1). Le circuit

Fig. 1.



secondaire comprend, en outre, une dérivation variable *b* empruntée au circuit d'une pile constante E', et que l'on règle par tâtonnements. On mesure la charge du condensateur M en le déchargeant sur un électromètre capillaire étalonné à cet effet, comme je l'ai indiqué dans mes Mémoires antérieurs.

Le pendule interrupteur réalise automatiquement les opérations suivantes :

1° Il interrompt une fois pour toutes en L un court circuit réunissant les électrodes de A.

2° Aussitôt après, il ferme en *o*, pendant un temps θ de l'ordre du centième de seconde, le circuit secondaire AM, et cette fermeture se reproduit d'oscillation en oscillation, jusqu'à ce que l'expérimentateur arrête le pendule. La durée θ (qu'il est inutile de mesurer) doit être suffisante pour que l'équilibre électrique puisse, à chaque fois, être considéré comme établi dans tous les circuits.

L'expérimentateur règle d'abord la dérivation *b* de façon que, après un seul contact en *o* (temps zéro), le condensateur M possède une charge nulle, ce qui fait connaître ε_0. On peut ensuite

opérer de deux manières : ou bien on répète le réglage de b de façon que la charge de M soit nulle après 1, 2, 3, ..., n oscillations du pendule, ce qui donnera ε et par suite $\varepsilon - \varepsilon_0$; et alors le condensateur M et l'électromètre ne servent que comme appareils de zéro; ou bien on ne touchera plus au réglage de b, fait une fois pour toutes, et la déviation de l'électromètre, obtenue en déchargeant le condensateur M au bout de 1, 2, 3, ..., n oscillations, fournira directement $\varepsilon - \varepsilon_0$. Ce dernier procédé, beaucoup plus rapide, ne peut être employé que si $\varepsilon - \varepsilon_0$ ne dépasse pas $0^{\text{volt}},014$ environ.

Pour les électrolytes en dissolution concentrée ou moyennement étendus, et pour les électrolytes fondus, r est négligeable par rapport à R, ε_0 sensiblement nul, et p se confond avec ε. En ce cas, les mesures sont, en général, très aisées.

5. *Étude du courant de décharge, vitesse de dépolarisation.* — On ignore *a priori* si la totalité de la quantité d'électricité Q qui a traversé le voltamètre s'y est fixée sous une forme récupérable, ou si quelque partie de cette électricité a passé comme, par exemple, dans un voltamètre à électrodes impolarisables, sous une forme non récupérable. Il ne suffit donc pas de mesurer la capacité apparente déduite de l'étude du courant de charge, il faut encore étudier la décharge du voltamètre pour déterminer ce qu'il est susceptible de rendre dans des conditions déterminées.

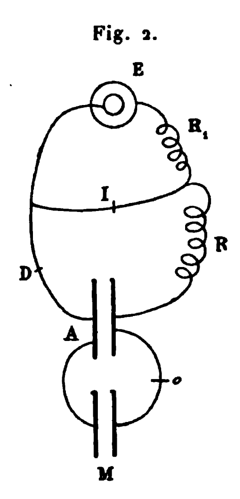
A cet effet, le voltamètre A, chargé à travers une grande résistance, est séparé de la pile au bout d'une certaine durée et fermé aussitôt sur une autre résistance métallique connue. On observe comme précédemment les charges du condensateur auxiliaire M au moment de l'interruption et après 1, 2, ..., n oscillations du pendule interrupteur.

La *fig.* 2 donne le schéma de la disposition employée. Le circuit principal EA est d'abord fermé à la main en D. Au bout du temps convenable, le pendule interrupteur est lâché et réalise les opérations suivantes :

1° Il ferme en I d'une manière permanente une dérivation sans résistance qui exclut du circuit de l'auge A la pile E et une certaine résistance R_1 variable à volonté;

2° Aussitôt après, il ferme en o la dérivation AoM du condensateur auxiliaire pendant une durée de l'ordre du centième de seconde, et cette fermeture se reproduit à chaque oscillation, jusqu'à ce que l'expérimentateur arrête le pendule.

Fig. 2.



La mesure des charges de M fait connaître la différence de potentiel initiale ε_0 de l'auge au moment où elle est séparée de la pile, et les différences de potentiel $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_n$ après 1, 2, ..., n oscillations. On en déduit les valeurs correspondantes p_0, p_1, $p_2, \ldots, p_n$ de la polarisation.

Nous désignerons en général par η_n le rapport

$$\eta_n = \frac{p_{n-1} - p_n}{\dfrac{p_{n-1} + p_n}{2}} \tag{2}$$

ou la vitesse moyenne de dépolarisation pendant le $n^{\text{ième}}$ intervalle. La quantité d'électricité débitée par le voltamètre, à travers la résistance extérieure, pendant cet intervalle, a pour valeur approchée, en désignant par τ la durée d'oscillation du pendule, $\frac{\tau(p_{n-1} + p_n)}{2R}$. Soit $\mathfrak{C}$ la capacité moyenne du voltamètre entre p_{n-1} et p_n, on a

$$\mathfrak{C}(p_{n-1} - p_n) = \frac{\tau(p_{n-1} + p_n)}{2R};$$

$$\mathfrak{C} = \frac{\tau}{R\eta_n}. \tag{3}$$

p_{n-1} et p_n étant en général assez peu différents, la capacité moyenne $\mathfrak{C}$ diffère peu de la capacité vraie, correspondant à la polarisation $\frac{p_{n-1}+p_n}{2}$.

B. — Capacités apparentes de charge.

6. *Formule empirique.* — Quand on charge un voltamètre par un courant I_0 d'intensité constante, on peut, en général, représenter la variation de la polarisation p avec le temps par une formule hyperbolique à deux constantes

$$(4) \qquad p = \frac{At}{1+Bt}.$$

Voici un exemple pris au hasard.

La durée d'oscillation du pendule $\tau = 1^s,38$ est prise pour unité de temps; les valeurs de p sont exprimées en dix-millièmes de daniell. Les deux électrodes sont égales; S désigne la surface totale de chacune d'elles (antérieure et postérieure), c la capacité du condensateur M, enfin C la capacité initiale du voltamètre, calculée comme il sera indiqué ci-dessous. La pile de charge est de 1 élément daniell.

Acide sulfurique ($1^{éq}$ par litre) (1).

$S = 101^{éq}$, $R = 300000^{ohms}$, $c = 1^{mf}$, $C\,(\text{calculé}) = 1740^{mf}$.

Temps.	p (en $\frac{1}{10000}$ de daniell) observé.	calculé.	Différence.	
1 (= 1″38)...	24,15	24,6	+0,45	$A = 0^{da},00264$
2...........	46,8	46,2	+0,6	$B = 0,075$
3...........	63,6	64,8	+1,2	$\varpi = \frac{A}{B} = 0^{da},0352$
4...........	78,3	81,6	+3,3	
5...........	90,6	96,6	+6,0	
8...........	126,9	132,6	+5,7	
10...........	153,6	151,8	−1,8	

Pour les mêmes électrodes dans le même électrolyte, le coefficient A varie proportionnellement à la force électromotrice E et

(1) 40^{gr} d'acide sulfurique anhydre par litre de dissolution.

en raison inverse de la résistance totale R, c'est-à-dire proportionnellement à l'intensité initiale $I_0 = \frac{E}{R}$ du courant. Le coefficient B peut être considéré comme invariable tant que I_0 est suffisamment faible, et, par suite, les valeurs de p demeurent proportionnelles à I_0.

Posant

(5) $$A = \frac{I_0}{C},$$

on écrira donc la formule (4)

(4 *bis*) $$p = \frac{I_0 t}{C(1 + Bt)},$$

dans laquelle C et B sont des coefficients dont la signification reste à déterminer.

7. *Signification des constantes.* — Occupons-nous d'abord de C; on a évidemment pour $t = 0$

(6) $$C = \lim \frac{I_0 t}{p} = \lim \frac{Q}{p},$$

en désignant par Q la quantité d'électricité qui a traversé le circuit au temps t. Le coefficient C est donc la *capacité initiale de polarisation du voltamètre pour une valeur négligeable de la force électromotrice de polarisation.*

8. La signification de B est moins facile à établir. Quand on fait croître t indéfiniment, p tend vers une limite ϖ,

(7) $$\varpi = \frac{I_0}{BC}.$$

Supposons cette limite atteinte et soit Γ la capacité vraie du voltamètre pour la valeur ϖ de la polarisation. L'accroissement $d\varpi$ de polarisation que la quantité d'électricité $I_0\,dt$ serait susceptible de produire, si les causes qui limitent la polarisation pouvaient être supprimées, serait donné par la relation

$$I_0\,dt = \Gamma\,d\varpi.$$

Posons

(8) $$v = \frac{d\varpi}{dt} = \frac{I_0}{\Gamma}.$$

Nous conviendrons d'appeler v la *vitesse de dépolarisation pendant la charge*.

De (7) et (8) on tire

$$(9) \qquad \frac{v}{\varpi} = \frac{C}{\Gamma} B.$$

Si l'on supposait la capacité Γ indépendante de ϖ, $\Gamma = C$, ce qui est *a priori* l'hypothèse la plus simple, et ce que l'expérience confirmera par la suite, pour le cas d'électrodes de platine, on aurait

$$(9\ bis) \qquad B = \frac{v}{\varpi}.$$

B représenterait alors la *vitesse proportionnelle de dépolarisation,* qui, dans les limites indiquées ci-dessus, serait une constante.

9. *Influence de la position des électrodes.* — Les expériences qui suivent se rapportent *exclusivement* à des électrolytes bons conducteurs. Deux électrodes égales plongeant dans le même liquide sont d'abord placées l'une au-dessus de l'autre, à une distance de quelques millimètres, comme les deux plateaux d'un condensateur; on les met ensuite sur le même plan; enfin, on les place dans deux auges séparées ne communiquant que par un ou deux siphons placés dans les angles et qui se prolongent jusqu'au voisinage des électrodes.

Dans ces divers cas, la distribution initiale du courant est aussi différente que possible : les dépôts électrolytiques réguliers, s'il s'en produit, doivent être très inégalement répartis et n'intéressent guère, dans les derniers cas, qu'une très petite portion des électrodes voisine de l'extrémité des siphons. Cependant les valeurs de p, observées pour les diverses positions des électrodes et pour une même durée, sont très voisines, c'est-à-dire que B et C demeurent sensiblement invariables, au degré de précision des expériences. Voici un exemple :

Azotate de potasse ($1^{éq}$ par litre).

$S = 101^{éq}$. $R = 100000^{ohms}$, $c = \frac{1}{2}^{mf}$, C (calculé) $= 1390^{mf}$.

Temps.	Électrodes super-posées.	Électrodes juxta-posées.	Siphons.	Moyenne.	Calcul.	Différence.
1...	94,5	94,5	85,5	91,5	91,8	+ 0,3
2...	162	»	162	162	171	+ 9
3...	229	»	225	227	239	+ 12
4...	288	»	288	288	300	+ 12
5...	351	382	360	364	354	— 10
6...	405	»	414	409	401	— 8

Des expériences de cette nature établissent, dans des limites assez étendues, l'*indépendance des deux électrodes au point de vue de tous les phénomènes de polarisation.*

10. *Capacité individuelle des électrodes.* — Un voltamètre est donc comparable, non à un condensateur unique, mais à un système de deux condensateurs disposés en tension. Soient C_1 et C_2 les capacités initiales des deux électrodes, C la capacité initiale de l'auge, on a, par définition,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \tag{10}$$

Il s'agit de déterminer séparément C_1 et C_2.

Les expériences du paragraphe précédent nous ont montré que la distribution initiale du courant sur des électrodes données est indifférente au point de vue de la polarisation acquise dans un temps donné : il faut en conclure qu'une électrode est également modifiée en tous ses points par le phénomène de la polarisation, que, par suite, sa capacité est indépendante de sa forme et proportionnelle à sa surface totale (pour une électrode plane, somme des deux surfaces antérieure et postérieure). Soient S_1, S_2 les surfaces totales des électrodes, K_1, K_2 deux coefficients à déterminer par l'expérience, on aura

$$C_1 = K_1 S_1,$$
$$C_2 = K_2 S_2,$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{K_1 S_1} + \frac{1}{K_2 S_2}. \tag{11}$$

Les coefficients K_1, K_2 sont les capacités initiales de polarisation rapportées à l'unité de surface.

Pour déterminer ces coefficients, M. Blondlot [1] a eu recours à un artifice ingénieux, consistant à faire l'une des quantités S_1, S_2 négligeable par rapport à l'autre : l'un des termes du second membre de (11) s'annule et la détermination de C équivaut à celle de l'un des coefficients K_1, K_2. M. Blondlot a ainsi reconnu que, pour des électrodes de même nature, ces deux coefficients sont égaux, c'est-à-dire que la capacité initiale de polarisation est indépendante du sens du courant. En désignant par K leur valeur commune, on a

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{K}\left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}\right). \tag{11 bis}$$

J'ai vérifié la formule (11 *bis*) directement; à cet effet, j'ai pris deux lames de platine identiques et laissant l'une d'elles invariable, j'ai réduit progressivement la surface de l'autre en en détachant, d'un coup de ciseaux, des fragments convenables.

En ce qui concerne le sens du courant, et en me bornant aux faibles polarisations employées d'ordinaire dans mes expériences, je n'ai ainsi constaté aucune différence systématique dans la valeur de la polarisation totale. Voici les valeurs de K obtenues, en moyenne, pour les deux directions du courant, et avec différentes valeurs de S_2 :

Azotate de soude (2éq par litre).

S_1.	S_2.	$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}$.	K.	Différence avec la moyenne.
cq	cq		mf	
101,3	100,80	0,01979	19,77	—0,36
»	51,24	0,02039	19,49	—0,64
»	26,60	0,04716	20,10	—0,03
»	14,88	0,07708	21,17	+1,04
	Moyenne...........		20,13	

Les différences sont tout à fait négligeables, eu égard aux variations dont la valeur de K est susceptible pour un couple donné de

(1) Blondlot, *Thèse de Doctorat; Journal de Physique*, 1re série, t. X, p. 227, 333 et 434; 1881.

lames, suivant l'état de leurs surfaces. La formule (11 *bis*) est donc vérifiée par l'expérience.

11. Tous les résultats qui précèdent sont des conséquences naturelles de la théorie de la couche double.

On se tromperait grossièrement toutefois si l'on y voyait une preuve absolue de la non-existence d'actions chimiques irréversibles compliquant le phénomène de la polarisation; car, si la distribution irrégulière du courant, résultant de la forme et de la position arbitraire des électrodes, transporte inégalement les produits de l'électrolyse aux différents points d'une électrode donnée, il s'établira aussitôt à sa surface des couples locaux dont l'effet est de diminuer les inégalités; dans le cas, seul étudié ci-dessus, de liquides très conducteurs et de très faibles intensités du courant principal, l'équilibre pourra être considéré comme rétabli presque instantanément par les couples locaux, c'est-à-dire que tout se passera à peu près comme si l'électrode avait été d'abord également modifiée en tous ses points. L'altération des lois prévues par la théorie de la couche double sera légère et pourra passer inaperçue.

Il est donc indispensable de pousser plus loin l'étude des phénomènes.

12. *Capacités aparentes de charge.* — Quand on fait croître progressivement l'intensité I_0 du courant de charge de façon à atteindre des polarisations p notables (de l'ordre du dixième de volt, par exemple), on reconnaît que la formule (5 *bis*)

$$p = \frac{I_0 t}{C(1 + Bt)} \qquad (5\ bis)$$

continue à s'appliquer et fournit des valeurs de C sensiblement invariables; mais B croît linéairement avec I_0, d'après la formule

$$B = \beta + \gamma I_0, \qquad (12)$$

dans laquelle β et γ sont des constantes.

On peut donc écrire la formule (5 *bis*) généralisée

$$p = \frac{I_0 t}{C(1 + \beta t + \gamma I_0 t)} \qquad (13)$$

ou en remplaçant $I_0 t$ par Q (quantité d'électricité qui a passé dans le circuit)

$$(14) \qquad p = \frac{Q}{(1+\beta t+\gamma Q)}.$$

Sous cette nouvelle forme, la formule p se présente comme une fonction de deux variables indépendantes, la quantité d'électricité et le temps.

La formule (14) indique pour une valeur de Q indéfiniment croissante une limite supérieure de la polarisation

$$P = \frac{1}{\gamma C}.$$

Si l'on attribue à P cette valeur, la capacité apparente $\frac{Q}{p}$ devient infinie, même pour $t = 0$. Il en est de même, à plus forte raison, de la capacité élémentaire

$$\frac{dQ}{dp} = \frac{C(1+\beta t)}{(1-\gamma p C)^2}.$$

13. *La variation avec le temps des capacités apparentes de polarisation est le signe certain d'actions chimiques illimitées*, c'est-à-dire d'une véritable électrolyse.

En ce qui concerne la variation de la capacité apparente avec la force électromotrice de polarisation atteinte, nous ignorons *a priori* si elle correspond ou ne correspond pas à une variation réelle de la charge électrique minimum que les électrodes doivent recevoir et *conserver* pour que la polarisation résultante croisse de dp. Pour s'en éclairer, il faut étudier ce qui se passe pendant la décharge du voltamètre, comme il a été indiqué ci-dessus.

C. — Étude du courant de décharge.

14. *Capacités efficaces pour la décharge.* — Voici, par exemple, les valeurs de la vitesse moyenne de dépolarisation η_1 pendant la première oscillation du pendule interrupteur, obtenues avec diverses valeurs de la polarisation moyenne $p = \frac{p_1+p_0}{2}$. Elles se rapportent à des électrodes de platine, à une dissolution

d'azotate de soude à $0^{éq},2$ par litre, et à une charge de $10^s,69$ de durée.

La décharge s'effectuait à travers une résistance de 2000 ohms, et la dépolarisation en circuit ouvert était négligeable.

$p = \frac{p_1+p_0}{2}$ en $\frac{1}{10000}$ de daniell.	η_1.
250	0,275
496	0,294
717	0,294
1046	0,284
1417	0,274
1902	0,265
Moyenne...	0,281

Il est impossible de saisir dans cette expérience une variation systématique de η_1 et, par conséquent, de la capacité efficace

$$\mathcal{C}_1 = \frac{\tau}{R\eta_1}.$$

Celle-ci demeure donc sensiblement constante.

Dans les mêmes limites, l'accroissement relatif de la capacité apparente de charge correspondant à la polarisation p et à un temps nul aurait pour valeur 1,288. Une diminution de η_1 dans un tel rapport n'aurait pu passer inaperçue. Il faut en conclure que, dans les limites de l'expérience, l'accroissement de la capacité apparente avec p tient à des phénomènes secondaires irréversibles. *La capacité vraie, celle qui correspond à un phénomène réversible, doit être sensiblement invariable.*

15. Quand on fait varier la durée de charge t, le coefficient η_1 correspondant à une valeur fixe de p décroît et, par conséquent, la capacité efficace $\mathcal{C}_1$ croît quand t augmente. Ainsi, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique à $1^{éq}$ par litre, on a trouvé [1]

t.	p.	η_1.
$10^s,69$	764	0,207
$50^s,69$	781	0,132

(1) Décharge à travers 2000 ohms.

16. Si l'on compare entre elles les valeurs de η, de η_1 à η_n, on observe un décroissement très sensible. Voici les valeurs de η pour des électrodes de platine, une dissolution de chlorure de sodium à $0^{éq},5$ par litre et $10^s,69$ de charge :

		Polarisation moyenne en $\frac{1}{10000}$ de daniell.
η_1	0,265	785
η_2	0,238	604
η_3	0,201	483
η_4	0,231	390
η_5	0,183	316
η_6 à η_7	0,201	239
η_8 à η_{10}	0,177	151
η_{11} à η_{15}	0,126	80

Ainsi les capacités efficaces, qui sont en raison inverse de η, croissent à mesure que la polarisation décroît, *contrairement à ce qui avait lieu pour les capacités apparentes de charge*, et cette variation peut aller du simple au double dans les limites de l'expérience. Cet accroissement et l'accroissement de $\mathcal{C}_1$ avec t (paragraphe précédent) sont des phénomènes de même ordre. On ne peut les attribuer qu'à la formation et à la destruction de *résidus à longue période* dont l'effet est d'accroître la capacité apparente de charge, à mesure que la durée de charge augmente ou que le potentiel s'élève, et d'accroître aussi la capacité efficace de décharge à mesure que l'abaissement du potentiel les rend disponibles. On voit quelle est la complication des phénomènes irréversibles de la polarisation.

17. La comparaison des valeurs de $\mathcal{C}_1 = \frac{\tau}{R\eta_1}$ pour des durées de charge t de plus en plus faibles permet d'éliminer à peu près complètement l'effet des résidus en calculant la limite de $\mathcal{C}_1$ pour $t = 0$. Celle-ci ne diffère plus sensiblement de la capacité initiale de charge C.

Il faut conclure de là que *la réversibilité des phénomènes de la polarisation est complète à la limite pour une polarisation et une durée de charge ou de décharge infiniment petites;* qu'elle ne l'est plus, dès que l'un ou l'autre de ces éléments prend une valeur finie. Le mot de *capacité de polarisation n'a donc*

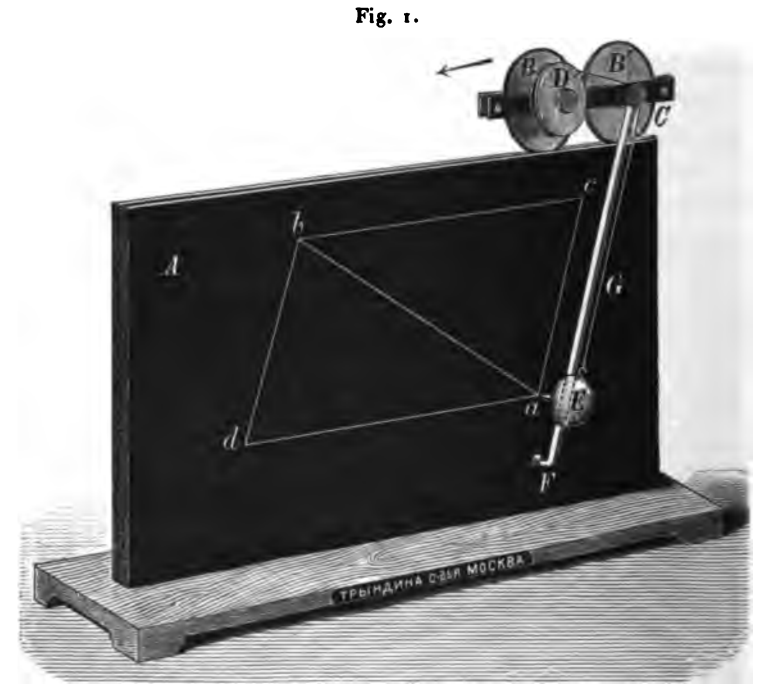
de sens bien défini expérimentalement que pour des valeurs nulles de p et de t. Cette *capacité initiale* peut seule être attribuée sans invraisemblance à une couche double.

Cinégraphe;

PAR M. CLEMENTISCH DE ENGELMEYER.

Un tableau vertical ardoisé A porte un rail sur lequel roule un équipage C monté sur deux roues B et B′. La roue B′ est folle, tandis

Fig. 1.



que la roue B est fixée à son axe. Cet axe porte sur l'une de ses extrémités une poulie D tournant lorsque l'on déplace l'équipage le long du rail. Sur la poulie D s'enroule un fil G, passant au-dessus de l'arc B′ et supportant une boule massive E. Cette boule glisse le long de la tige F qui peut être fixée sous divers angles. La boule

représente le corps affecté simultanément de deux mouvements qu'il s'agit de composer. Un morceau de craie cylindrique porté par la boule trace sur le tableau son mouvement résultant. Supposons l'équipage mis en mouvement dans la direction de la flèche. La poulie D tournant, la boule E monte le long de la tige F. C'est le mouvement relatif. L'autre mouvement composant est celui de la translation de la tige elle-même. C'est le mouvement de l'entraînement. Le mouvement absolu est représenté par la droite *ab* que la boule trace sur le tableau.

En communiquant à la boule les mêmes mouvements l'un après l'autre, on trace les deux côtés du parallélogramme, *ac* et *cb* ou *ad* et *db*, selon l'ordre dans lequel on prend ces deux mouvements. Or on voit que :

1° Le phénomène est purement cinétique;

2° Le parallélogramme est tracé automatiquement, et l'on voit que la résultante en forme la diagonale, tandis que les composantes en forment les côtés;

3° La grandeur des composantes et l'angle qu'elles font entre elles peuvent être pris au gré de l'expérimentateur, et toutes ces relations sont évidentes et directement mesurables;

4° Les deux vitesses composantes peuvent être transmises non seulement simultanément, mais aussi alternativement, et l'élève voit que le résultat est le même;

5° Enfin on trace sur le tableau un parallélogramme net et exact dont on peut se servir comme d'un dessin, en ôtant simplement le mobile du tableau.

Remarque. — Pour parler de vitesses dans le sens strict du mot on n'a qu'à mouvoir l'équipage de façon que celui-ci parcoure le chemin *cb* pendant une seconde.

Théorie du cinégraphe. — M. Boleslas Mlodzieiowski, adjoint à l'Université de Moscou, a donné la théorie suivante. Il s'agit de trouver le profil de la poulie MN à fixer sur l'axe de la roue B pour que le cinégraphe trace la courbe donnée UV ..., $y = F(x)$.

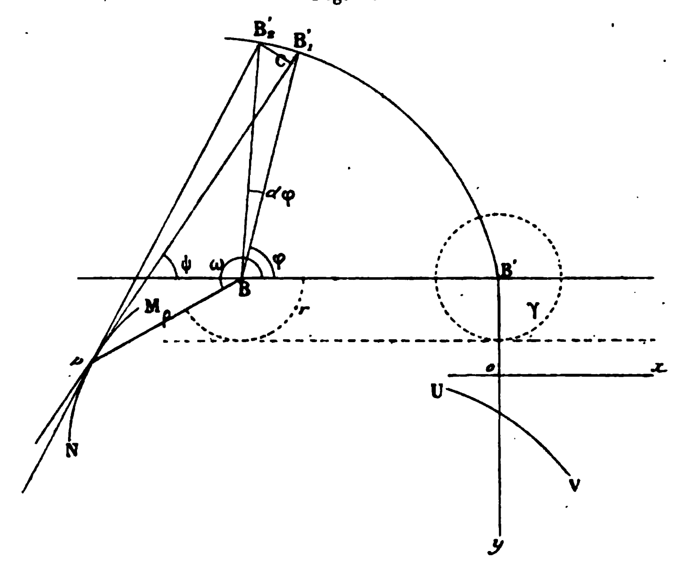
Supposons la roue B avec la poulie MN immobiles dans l'espace, l'origine des coordonnées polaires en B. Alors

(1) $$x = r\varphi.$$

L'équation de pB'_1 (position du fil) est

$$\rho \sin(\omega - \psi) = l \sin(\varphi - \psi). \tag{2}$$

Fig. 2.



Dans le triangle élémentaire $CB'_1 B'_2$

$$\frac{CB'_1}{B'_1 B'_2} = \sin(\varphi - \psi) = \frac{r\,dy}{l\,dx}. \tag{3}$$

En tenant compte de (1), nous pouvons supposer

$$\frac{dy}{dx} = f(\varphi), \tag{4}$$

Introduisons (3) et (4) dans (2)

$$\rho \sin(\omega - \psi) = r f(\varphi). \tag{5}$$

MN, comme enveloppe de pB'_1, pB'_2, ..., se trouve à l'aide de (5) et (6)

$$\rho \cos(\omega - \psi) = r \frac{f'(\varphi)\cos(\varphi - \psi)}{f'(\varphi) - \cos(\varphi - \psi)}. \tag{6}$$

D'où il résulte

$$\operatorname{tang}(\omega - \psi) = \operatorname{tang}(\varphi - \psi) - \frac{f(\varphi)}{f'(\varphi)}. \tag{7}$$

Ainsi, dans le cas d'une droite

$$y = Cx,$$

nous aurons

$$f(\varphi) = a \quad \text{et} \quad f'(\varphi) = 0,$$

d'où il suit

$$\rho = ar.$$

Dans le cas d'une parabole

$$y = Cx^2,$$

nous aurons

$$(8) \qquad f(\varphi) = a\varphi,$$

et ainsi de suite.

Pour la construction du profil MN il est cependant préférable de ne pas employer l'équation polaire, mais de suivre un procédé plus simple, à savoir :

Les équations (5) et (8) donnent

$$\sin(\omega - \psi) = D\varphi,$$

c'est-à-dire que le sinus de l'angle $BB'_1 p$ est proportionnel à l'angle φ, qu'on prend comme variable indépendante.

SÉANCE DU 4 MAI 1894.

Présidence de M. de Romilly.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 20 avril est lu et adopté.

Est élu membre de la Société :

M. Izarn (Joseph), Professeur au Lycée Pascal, à Clermont-Ferrand.

M. P. Janet expose à la Société le principe d'une méthode nouvelle d'inscription électrochimique des courants alternatifs : soient A et B deux points entre lesquels existe une différence de potentiel alternative. Sur un cylindre métallique enregistreur on dispose une feuille de papier imprégnée d'une solution de ferrocyanure de potassium et d'azotate d'ammoniaque, et à la surface de ce papier, un style en fer ou en acier. On fait communiquer le cylindre d'une part, le style de l'autre avec les points A et B, et, en faisant tourner rapidement le cylindre, on obtient une trace

discontinue de bleu de Prusse, dont les maxima, très nets, correspondent aux maxima positifs (style +) de la force électromotrice étudiée.

L'auteur présente à la Société un certain nombre de feuilles portant des graphiques ainsi obtenus. Il montre qu'on peut avantageusement appliquer la méthode aux mesures de fréquence et de différences de phases. Les principaux cas étudiés ont été les suivants :

1° Deux résistances sans self-induction en série;

2° Deux résistances dont l'une inductive en série;

3° Partage d'un courant alternatif en deux branches dont l'une est inductive;

4° Forces électromotrices triphasées (montagne en étoile).

L'auteur termine en attirant l'attention sur ce fait que, si la méthode graphique n'est pas susceptible d'une grande précision, en revanche elle a l'avantage de rendre visible aux yeux des phénomènes qui jusque-là ne pouvaient être étudiés que par des méthodes abstraites, algébriques ou géométriques.

M. Pellat communique une Note de M. Van Aubel sur la résistance électrique de quelques nouveaux alliages, récemment fabriqués en Allemagne et étudiés à l'Institut physico-technique de l'Empire. Tout d'abord M. Van Aubel signale un acier, nommé *kruppine*, fabriqué à l'usine de M. F. Krupp à Essen; cet alliage présente une résistance spécifique de 84,7 en microhms $\frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}$ à 18° C., ou, s'il a été auparavant chauffé pendant plusieurs jours, 85,5; le coefficient moyen de variation avec la température diminue un peu quand la température s'élève, mais est toujours voisin de +0,0007. Cet acier a donc une résistance spécifique relativement élevée (celle du maillechort est 20,76); il peut être porté à une température de 600° sans changer de structure. On le livre en fil ou en lame. L'auteur fait ensuite connaître des alliages fabriqués par les usines de nickel de MM. Fleitmann, Witte et Cie, à Schwerte (Westphalie); le tableau suivant montre que les nouveaux alliages ont une résistance électrique très grande, et un coefficient de variation avec la température très faible; ils pourront rendre de grands services, particulièrement le fil $I^a I^a$. Il reste toutefois à rechercher s'il ne donne pas avec le laiton une force thermo-électrique notable :

Désignation du fil.	Résistance à 20° en microhms $\frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}$.	Variation pour 1°.
Fil breveté « Extra » dur	53,1	−0,000029
» doux	50,3	+0,000059
Fil breveté $I^a I^a$ dur	50,2	−0,000011
» doux	47,1	+0,000005
Fil de nickeline I dur	43,6	+0,000076
» doux	40,7	+0,000077

M. Guillaume fait observer, à ce propos, que la résistance des alliages de nickel et de cuivre, soit seuls, soit avec du manganèse ou du fer, a été étudiée d'une manière systématique par divers savants, entre autres par MM. Lindeck et Feussner; lui-même a fait une étude détaillée de quelques-uns de ces alliages. La plus haute résistance spécifique (108 microhms-centimètre) a été obtenue avec l'alliage 68,6 Cu, 30 Mn, 1,3 Fe. Les alliages en question ont l'avantage de posséder un coefficient thermique très faible, passant même du positif au négatif lorsque la température s'élève, mais ils présentent des résidus qui rendent leur emploi très délicat. Le pouvoir thermo-électrique élevé du constantan (40 μv par degré par rapport au cuivre) peut ne pas être une source de désagréments si l'on a soin de souder le fil à des plaques de constantan, qui sont elles-mêmes soudées au cuivre ou au laiton des boîtes de résistance ou des ponts de Wheatstone.

M. G. Wyrouboff fait remarquer que l'étude des corps doués du pouvoir rotatoire, à la fois à l'état de cristaux et en solution, a acquis aujourd'hui une importance théorique considérable. Elle nous permettra de choisir entre l'interprétation physique du phénomène du pouvoir rotatoire moléculaire et l'explication proposée par la Stéréochimie. Nous connaissons actuellement d'une façon certaine les causes du pouvoir rotatoire cristallin : nous n'avons donc plus à chercher que la cause du pouvoir rotatoire moléculaire. Si cette cause est la même, si elle réside dans les deux cas dans le croisement d'une même espèce de molécules, il est clair que le rapport des grandeurs des deux pouvoirs devra être le même pour tous les corps. Un semblable résultat créerait pour l'interprétation stéréochimique une condition strictement limitative : dans tous les corps doués du double pouvoir rotatoire la déviation du plan de polarisation devra toujours être de même signe dans ces cristaux et dans la solution, la molécule chimique ne pouvant être à la fois gauche et droite.

Malheureusement, des trois corps doués du double pouvoir rotatoire signalés jusqu'ici, le sulfate de strychnine, le camphre du matico et le succinate d'apocinchonine, aucun ne permet des mesures suffisamment précises pour être comparées. Le premier, parce que sa solution renferme deux hydrates différents mélangés en proportion variable suivant la température, le second parce que ses cristaux présentent des macles et des enchevêtrements de lamelles donnant un rayon elliptiquement polarisé, le troisième enfin, parce qu'il se dissocie plus ou moins dans sa solution et que ses cristaux ont une structure généralement très complexe.

M. Wyrouboff a trouvé une quatrième substance qui ne laisse rien à désirer au point de vue de la régularité et de la constance des propriétés optiques, aussi bien dans les cristaux que dans la solution, et qui rend possible la comparaison. En effet, le dextrotartrate neutre de rubidium donne en solution pour toutes les concentrations $[\alpha]_D = +20°,1$; ses cristaux qui sont aussi homogènes que les plus beaux quartz donnent pour 1^{mm} $\alpha_D = -10°,7$.

Le lévotartrate donne en solution $[\alpha]_D = -20^\circ,2$; se scristaux $\alpha_D = +10^\circ,5$. La densité du sel étant 2,731 on trouve que les deux pouvoirs rapportés au millimètre donnent $\frac{10^\circ,6}{0^\circ,55} = 19,1$.

Ces deux corps présentent, comme on voit, ce fait remarquable que, pour chacun d'eux, les deux pouvoirs rotatoires sont de signes contraires.

Il ne reste donc plus qu'à trouver un autre corps permettant la comparaison exacte des deux pouvoirs. Si le rapport est trouvé voisin de 19, la question du pouvoir rotatoire moléculaire sera définitivement jugée en faveur de l'interprétation purement physique.

Sur une méthode d'inscription électro-chimique des courants alternatifs;

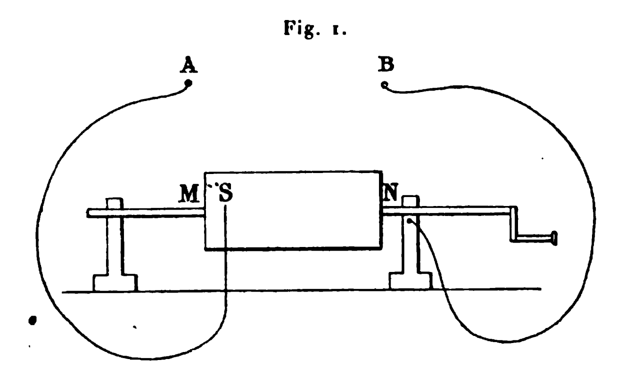
PAR M. P. JANET.

L'étude des courants alternatifs présente, comme on le sait, des difficultés beaucoup plus considérables que celle des courants continus; ces difficultés tiennent à deux causes : d'abord à la complexité et à l'apparence souvent paradoxale des faits tenant principalement aux lois générales de l'induction; en second lieu, à la multiplicité des éléments à mesurer : tandis que, pour caractériser un courant continu, il suffit de connaître son intensité; pour caractériser un courant alternatif, il faut connaître non seulement son intensité efficace, mais encore sa fréquence; et tandis que, pour comparer deux courants continus, il suffit de connaître leurs intensités relatives, pour comparer deux courants alternatifs, il faut connaître non seulement leurs intensités efficaces relatives, mais encore leur différence de phase; aussi nous pensons qu'une méthode simple, ne présentant aucune difficulté expérimentale, rendant visible aux yeux un certain nombre de ces éléments propres aux courants alternatifs, et permettant même de les mesurer avec une approximation suffisante, sera bien accueillie par les électriciens. Voici en quoi consiste cette méthode.

Soient A et B (*fig.* 1) deux points entre lesquels existe la différence de potentiel alternative que nous voulons étudier. Sur un cylindre enregistreur métallique MN on dispose une feuille de papier imbibée de la solution de ferrocyanure de potassium et

d'azotate d'ammoniaque ([1]) qu'on emploie dans le télégraphe électro-chimique de Bain; à la surface du papier appuie légèrement un style en fer ou en acier (une aiguille à tricoter usée à la meule en pointe légèrement mousse convient bien). On met en

Fig. 1.



communication le cylindre d'une part, la pointe de l'autre avec les deux points A et B, puis on fait tourner rapidement le cylindre. Chaque fois que l'excès de potentiel de A sur B passe par un maximum positif, une trace bleue s'imprime sur le papier. On obtient ainsi une ligne discontinue dont chaque maximum, très net, correspond à une période de la force électromotrice étudiée. Remarquons que, le circuit dérivé très résistant ASB ne présentant pas de self-induction, le courant qui produit l'inscription n'est pas décalé sur la différence de potentiel qui le produit et qu'on veut étudier.

Pour avoir de bonnes épreuves, il convient d'employer un papier assez fort, et de le laisser tremper quelques heures dans la dissolution de ferrocyanure; on l'applique alors sans pli ni bulle d'air sur le cylindre, puis, à l'aide d'un rouleau de papier buvard de bureau, on enlève rapidement l'excès de la dissolution : il faut que la surface du papier devienne mate, sans cependant qu'il soit trop sec. On approche alors la pointe S et l'on procède immédiatement à l'inscription; puis on lave à grande eau et l'on sèche.

([1]) Parties égales des solutions saturées, six parties d'eau.

APPLICATIONS DE LA MÉTHODE.

La méthode électro-chimique d'inscription des courants alternatifs s'applique particulièrement bien à l'étude des fréquences et des différences de phase. Nous en donnerons quelques exemples.

1° *Mesure d'une fréquence.* — Soit à mesurer la fréquence d'un courant alternatif distribué à 110 volts. Disposons en série cinq ou six lampes de 20 volts, et prenons les deux bornes de l'une d'elles comme points A et B de l'exposé général qui précède : nous ferons donc communiquer A avec le style, B avec le cylindre. A côté du premier style, disposons-en un second dans lequel une horloge enverra toutes les secondes un courant. Il suffit alors pour avoir la fréquence de compter le nombre de maxima qui existent entre deux signaux consécutifs de l'horloge.

Ce procédé a été appliqué au courant que fournit au Laboratoire d'électricité industrielle de la Faculté des Sciences de Grenoble la station centrale de la Société grenobloise d'éclairage électrique. Ce courant provient d'alternateurs Zipernowsky à 2000 volts et est abaissé à 110 volts par transformateurs. La fréquence obtenue a été de 44. On voit que cette fréquence est un peu plus grande que la fréquence normale 42 indiquée pour les alternateurs Zipernowsky.

J'ai répété des mesures analogues au moyen d'un alternateur Gramme auto-excitateur et mis en mouvement par un moteur à gaz. La fréquence moyenne était 70. Tous les coups de piston du moteur, d'ailleurs, se reconnaissaient dans l'inscription, aussi nette que les précédents.

Cette méthode d'inscription des fréquences peut recevoir un certain nombre d'applications. D'abord, notre appareil conserve une trace écrite de la marche des machines, et peut par suite servir d'appareil de contrôle ou de tachymètre enregistreur; mais voici un autre cas important où il pourrait aussi rendre de réels services. Supposons qu'il s'agisse d'accoupler deux alternateurs situés dans deux usines différentes, distantes de plusieurs kilomètres (le cas s'est déjà présenté); la première condition à remplir est que ces deux alternateurs aient la même fréquence; il faut

donc que l'usine principale qui fait le couplage ait le moyen de contrôler la marche de l'usine secondaire : le procédé graphique que nous indiquons permet évidemment de le faire avec la plus grande sécurité; il ne supprime pas, bien entendu, le rôle des indicateurs de phases qui serviront lorsque l'égalité de fréquence sera obtenue.

2° *Étude des différences de phase.* — Soient trois points A, B, C pris sur un circuit alternatif. Supposons que les différences de potentiel qui existent entre A et B d'une part, C et B de l'autre, soient décalées l'une par rapport à l'autre, d'une certaine quantité que l'on veut mesurer. Mettons le point B en communication avec le cylindre, les points A et C en communication avec deux styles S et S′ appuyant sur le papier; on obtiendra deux traces discontinues, et il sera facile de mesurer la quantité dont l'une est déplacée par rapport à l'autre, c'est-à-dire d'avoir, en fractions de période, la différence de phase cherchée.

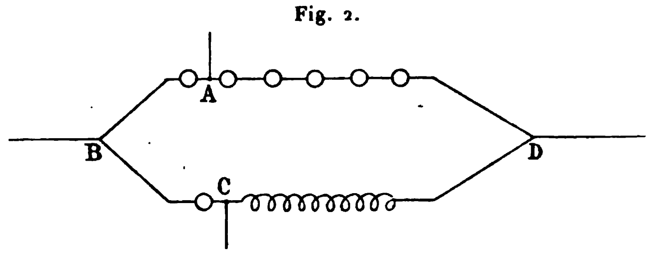
Je n'insiste pas sur les applications très nombreuses que l'on peut faire de cette méthode; j'indiquerai seulement quelques cas que j'ai réalisés :

1° Supposons que les trois points A, B, C soient disposés en série et séparés par des résistances non inductives (nous pourrons par exemple prendre les bornes de deux des lampes précédemment employées). Il est évident que les excès de potentiel de A et de C sur B sont décalés, l'un par rapport à l'autre, d'une demi-période : en effet, au moment où A présente sur B un excès maximum positif, C présente sur B un excès maximum négatif. Les maxima de l'une des deux courbes doivent donc partager en deux parties égales les intervalles compris entre les maxima de l'autre. C'est ce que l'expérience vérifie avec une grande exactitude.

2° On sait que, lorsqu'un courant alternatif se bifurque entre deux branches, si l'une de ces branches contient une bobine, tandis que l'autre ne présente pas de self-induction, les deux courants dérivés sont décalés l'un par rapport à l'autre, le courant qui passe à travers la bobine étant en retard sur l'autre au plus d'un quart de période. C'est ce phénomène que je me suis proposé de mettre en évidence. La disposition de l'expérience était la suivante.

Un courant alternatif se bifurque en un point B (*fig.* 2) entre deux branches BAD, BCD. La branche BAD est composée de 20 volts en tension. La branche BCD est composée d'une lampe de 20 volts et d'une bobine à noyau de fil de fer. D'après ce qui précède, le courant BCD doit présenter un retard sur le courant BAD. Pour mettre ce retard en évidence, on met le point B en communication avec le cylindre, les points A et C avec les deux styles.

Fig. 2.



On constate que l'une des deux courbes est en retard sur l'autre d'environ un quart de période : c'est celle qui correspond à la branche qui contient la bobine. En examinant attentivement cette ligne, on observe de plus un fait intéressant : les maxima y sont plus allongés que dans l'autre. J'attribue ce fait à la présence du fer dans la bobine qui doit, non seulement retarder, mais encore déformer le courant. Ainsi la méthode d'inscription électrochimique permet d'étudier, non seulement les fréquences et les phases, mais encore, jusqu'à un certain point, la forme des courants alternatifs. Peut-être, avec quelques précautions particulières, pourrait-on s'attacher à perfectionner ce dernier point de vue, ce qui aurait un grand intérêt.

3° Outre les deux cas qui précèdent, j'ai encore étudié quelques autres cas particuliers. Disposons en série sur un circuit alternatif une bobine AB et des lampes BC, CD, etc. Faisons communiquer le point B avec le cylindre, les points A et C avec les styles. Nous reproduisons le premier cas, sauf qu'ici la résistance AB présente de la self-induction. Les points maxima de la ligne correspondante devront donc être en retard de plus d'une demi-période sur les maxima de l'autre ligne. C'est ce que l'expérience vérifie.

4° Enfin, comme dernière application, j'ai inscrit des forces électromotrices triphasées. Le montage en étoile se prête particu-

lièrement bien à l'expérience. Soient O le centre de l'étoile, A, B, C les sommets. On fait communiquer le point O avec le cylindre, les points A, B, C avec trois styles voisins. On obtient trois lignes déplacées, l'une par rapport à l'autre, d'un tiers de période.

Toutes ces applications ont le grand intérêt de rendre visibles aux yeux des phénomènes qui, jusqu'ici, n'étaient étudiés qu'au moyen de formules algébriques ou de constructions géométriques; c'est à ce titre, nous l'espérons, que notre méthode pourra rendre quelques services.

Sur la résistance électrique de quelques alliages nouveaux;

PAR M. EDM. VAN AUBEL.

Il me paraît intéressant de faire connaître les propriétés électriques de quelques alliages récemment fabriqués en Allemagne, et qui ont été essayés à l'Institut physico-technique.

Les renseignements qui sont contenus dans cette Note m'ont été obligeamment fournis par les fabricants auxquels je tiens à exprimer ici mes remercîments.

1. *Kruppine.* — Cet alliage pour résistances électriques est fabriqué aux aciéries de M. Fried. Krupp à Essen (Prusse). Cet acier a été soumis à deux séries d'expériences à l'Institut physico-technique de Charlottenbourg.

Dans une première série d'expériences, le fil a été recouvert d'une couche de gomme-laque et chauffé ensuite pendant plusieurs heures à 150° C., puis pendant deux heures à 200° C.

Les mesures de résistances ont été faites alors successivement aux températures de 150° C., 100° C., 50° C. et à la température du laboratoire.

Résultats.

Poids spécifique.	Résistance électrique spécifique à 18° C. en microhms $\frac{cm}{cm^2}$.	Coefficient moyen de température.
8,107	84,7	entre 18° et 50° : +0,000791
		entre 18° et 100° : 0,000766
		entre 18° et 150° : 0,000749

Dans la seconde série d'expériences le fil a été chauffé auparavant, pendant plusieurs jours, à 170°C.

Résultats.

Résistance électrique spécifique à 20° C. en microhms $\frac{cm}{cm^2}$.	Coefficient moyen de température.
85,5	entre 25° et 73° : 0,00076
	entre 73° et 123° : 0,00069
	entre 123° et 154° : 0,00066

Le Tableau suivant permet de comparer la kruppine à d'autres alliages dont on se sert pour les résistances électriques :

Métaux.	Résistance spécifique en microhms centimètres (¹).	Coefficient de température.
Maillechort.........	20,76 (à 0°)	0,00044
Manganine	34,0	presque nul : +0,000008 à +0,000018 (²)
Constantan.........	50	presque nul.
Rheotan............	52,5 (à 0°)	0,00041
Acier au manganèse.	75 (à 15° C.)	0,00136
Ferro-nickel recuit.	78,3 (à 0°)	0,00093
Kruppine..........	85,5 (à 20° C.)	0,0007
Mercure liquide.....	94,34 (à 0°)	0,00072

Comme on le voit, le nouvel acier fabriqué à l'usine Krupp a une très grande résistance électrique qui est seulement de 10 pour 100 plus faible que celle du mercure.

Une autre propriété très importante de cet alliage c'est de pouvoir être porté à une température de 600° C. sans subir le moindre changement de structure; il est loin d'en être de même des métaux et surtout des alliages employés jusqu'ici pour résistances électriques (³).

Enfin, au point de vue mécanique, la kruppine présente une résistance absolue de 60^{kg} par millimètre carré.

(¹) *Voir* E. Hospitalier, *Formulaire de l'Électricien*, p. 114, 129 et 130; 1893.

(²) Landolt et Börnstein, *Physikalische-chemische Tabellen*, 2ᵉ édition, p. 506; 1894.

(³) *Voir* notamment, pour ce qui concerne la manganine, *L'Électricien*, p. 314; 5 novembre 1892.

Cet acier est fabriqué en fil ayant un diamètre compris entre $0^{mm},5$ et 5^{mm}. Entre $0^{mm},5$ et 2^{mm}, le diamètre du fil peut varier de $0^{mm},25$; entre 2^{mm} et 5^{mm} il peut être augmenté de $0^{mm},5$.

La kruppine est aussi livrée en lame ayant une épaisseur de $0^{mm},5$, 1^{mm}, 2^{mm}, 3^{mm} ou 4^{mm}.

2. *Alliages fabriqués par les laminoirs de nickel de MM. Fleitmann, Witte et Cie, à Schwerte (Westphalie).* — Ces alliages ont été étudiés sous forme de fils.

Les expériences ont été faites de la manière suivante : les deux bouts du fil ont été soudés à de petits blocs de cuivre. Après avoir déterminé la longueur et le diamètre du fil, on l'a enroulé sur une lame de mica et chauffé dans une étuve, pendant vingt-quatre heures, à une température de 130° C. La résistance électrique du fil a été mesurée à différentes températures, dans un bain de pétrole, par la méthode du pont de Wheatstone.

Désignation du fil.	État physique.	Résistance en microhms d'un fil ayant 1^{cm} de longueur et 1^{cmq} de section à 20° C.	Variation de la résistance pour 1° d'élévation de la température.
Fil breveté pour résistances *extra*	dur	53,1	—0,000029
»	doux	50,3	+0,000059
Fil breveté pour résistances I^aI^a	dur	50,2	—0,000011
»	doux	47,1	+0,000005
Fil de nickeline brevetée I	dur	43,6	+0,000076
»	doux	40,7	+0,000077

Ces résultats montrent que les nouveaux alliages ont une résistance électrique très grande et un coefficient de température très faible.

L'alliage *fil breveté pour résistances électriques* I^aI^a, notamment, a une résistance électrique supérieure et un coefficient de température plus faible que la manganine adoptée actuellement par l'Institut physico-technique allemand pour la fabrication des résistances électriques de précision.

Toutefois, de nouvelles recherches sont nécessaires pour déterminer si le nouvel alliage convient pour cet usage. Peut-être

présente-t-il, entre autres, les mêmes inconvénients que le constantan, c'est-à-dire qu'il donne lieu, avec le laiton, à un élément thermoélectrique ayant une force électromotrice notable ([1]).

Sur un nouveau corps à double pouvoir rotatoire;

Par M. G. Wyrouboff.

Les corps optiquement actifs à la fois en cristaux et en solution présentent un intérêt théorique considérable, car ils nous permettent d'entrevoir la possibilité de trancher le litige entre les deux interprétations du pouvoir rotatoire moléculaire. L'une de ces interprétations voit la cause du phénomène dans la dissymétrie de la *molécule chimique,* l'autre dans la pseudo-symétrie de la *particule cristalline.*

La première question qui se pose est celle de savoir si les deux pouvoirs rotatoires dont la loi fondamentale est la même, ont une cause unique, quelle que soit d'ailleurs cette cause, ou deux causes différentes. En effet, si la rotation moléculaire et la rotation cristalline sont le résultat d'une même propriété de la matière, il est clair qu'entre le pouvoir rotatoire moléculaire et le pouvoir rotatoire cristallin d'une substance doublement active, il doit y avoir un rapport qui sera toujours le même quelle que soit la substance considérée. En d'autres termes et en désignant par $[\alpha]$ le pouvoir spécifique moléculaire et $[\alpha']$ le pouvoir spécifique cristallin qui est relié au premier par la formule $[\alpha'] = \frac{d[\alpha]}{100}$, d étant la densité du corps cristallisé, il faut que $\frac{[\alpha']}{[\alpha]}$ soit constant pour tous les corps doués du double pouvoir rotatoire.

([1]) *Voir* à ce sujet *L'Électricien,* p. 314; 5 novembre 1892.

K. Strecker, *Les forces thermoélectriques comme causes d'erreurs dans les instruments de mesure* (*Elektrotechnische Zeitschrift,* 6 octobre 1893, ou *Lumière électrique*, t. IV; 1893.

V. Fuchs, *Über das thermo-elektrische Verhalten einiger Nickel-Kupfer Legierungen*, Graz; 1893.

Klemenčič et Czermak, *Annalen der Physik*, t. L, note au bas de la p. 175; 1893.

Cette première question étant résolue expérimentalement, le débat se réduit à la solution d'une seconde question. Il est évident, en effet, que, si nous avons affaire dans les deux cas à une même propriété, l'interprétation chimique se trouve limitée par une condition très précise. *Une même substance ne peut avoir en solution et en cristaux deux rotations inverses,* une molécule n'étant pas dissymétrique lorsqu'elle est gauche et droite en même temps.

Il suit de là que l'interprétation *stéréochimique* serait définitivement condamnée si l'on arrivait à démontrer expérimentalement ces deux faits :

1. *Il existe des corps qui sont dextrogyres en solution et lévogyres en cristaux.*

2. *Pour tous les corps actifs en solution et en cristaux, le rapport des deux pouvoirs rotatoires est exprimé par une constante.*

Jusqu'ici aucun de ces deux faits n'a pu être établi, car on ne connaissait guère qu'un seul corps doué du double pouvoir rotatoire, le sulfate de strychnine, lévogyre en solution et lévogyre aussi en cristaux. Tout récemment M. Traube ([1]) a découvert le pouvoir rotatoire moléculaire dans le camphre du matico dont le pouvoir rotatoire cristallin avait été observé par M. Hintze ([2]). Ici encore les deux rotations étaient gauches. J'ai enfin signalé le double pouvoir rotatoire dans le succinate d'apocinchonine ([3]) qui est dextrogyre en solution et en cristaux. Toutes ces substances donnent, on le voit, un pouvoir rotatoire de même sens pour les cristaux et pour leur solution. Malheureusement aucune d'elles ne se prête à des mesures quelque peu exactes. Le sulfate de strychnine présente deux hydrates, l'un à $5H^2O$ clinorhombique, l'autre à $6H^2O$ pseudoquadratique, doué du pouvoir rotatoire. Le pouvoir rotatoire moléculaire des deux hydrates est très différent, mais il ne peut être mesuré que pour l'hydrate inférieur qui seul existe dans une solution alcoolique.

Dans une solution aqueuse les deux hydrates existent toujours

([1]) GROTH, *Zeitsch. f. Kryst.* p. 23, 47; 1894.
([2]) *Pogg. Ann.*, p. 157, 127; 1876.
([3]) *Ann. de Chim. et de Phys.*, 7e série, p. 1-89; 1894.

simultanément en proportions variables suivant la température et la concentration. La valeur de [α] qu'on trouve ne correspond donc à aucun corps défini. Il faut ajouter, de plus, que les cristaux du sulfate de strychnine présentent des anomalies optiques, que dès lors la mesure de la déviation du plan de polarisation est très incertaine, le rayon émergeant du cristal étant généralement elliptique.

Dans le camphre du matico qui ne se combine pas avec ses dissolvants, le pouvoir rotatoire moléculaire est parfaitement constant; M. Traube, en effet, a trouvé pour le camphre fondu $[\alpha]_D = -29°,1$, pour sa solution à 10 pour 100 dans le chloroforme $-28°,7$; j'ai trouvé pour sa solution à 5,8 pour 100 dans l'alcool absolu $-29°$. Mais les cristaux présentent de telles irrégularités dans leurs propriétés optiques qu'il faut renoncer à mesurer leur pouvoir rotatoire; chaque cristal, chaque plage d'une lame taillée perpendiculairement à l'axe optique, donne pour α une valeur différente qui peut varier du simple au double. Quant au succinate d'apocinchonine, il se dissocie dans sa solution aqueuse, et ne peut se déposer que dans une liqueur fortement acide; d'autre part, ses cristaux présentent des phénomènes encore moins réguliers que ceux qu'on observe dans les deux corps précédents.

Le tartrate neutre de rubidium, dans lequel j'ai constaté le double pouvoir rotatoire, est la première substance permettant une mesure précise des phénomènes. Ce sel est anhydre quelle que soit la température à laquelle il se dépose; son pouvoir rotatoire moléculaire ne varie aucunement avec la concentration; ses cristaux, qu'on peut facilement avoir aussi gros qu'on veut, ont une structure remarquablement régulière, et ce n'est que très rarement qu'on constate en lumière convergente une légère dislocation de la croix. Le tartrate de rubidium présente une autre particularité intéressante. Les cristaux sont *lévogyres* et donnent une solution qui est *dextrogyre*. C'est l'inverse qui a lieu si l'on prépare le sel avec l'acide lévotartrique.

J'ai trouvé pour le dextrotartrate

Solution..... $[\alpha]_D = +20°,1$. Cristaux...... $\alpha_D = -10°,7$

Pour le lévotartrate

Solution..... $[\alpha]_D = -20°,2$. Cristaux ..... $\alpha_D = +10°,5$

La densité des cristaux est de 2,731. En ramenant le pouvoir rotatoire moléculaire au pouvoir rotatoire du corps solide de 1^{mm} d'épaisseur, on trouve pour l'un +0°, 548 et pour l'autre —0°,550. Le rapport entre les deux pouvoirs est donc de $\frac{10°,7}{0°,548} = 19,52$ pour le dextrotartrate et de $\frac{10°,5}{0°,55} = 19,09$ pour le lévotartrate ou sensiblement 20.

Cette observation, jusqu'à présent unique, apporte à la solution de la question du pouvoir rotatoire moléculaire un élément important, car elle l'enferme dans un étroit dilemme. En effet, ou bien les causes qui produisent les deux pouvoirs rotatoires sont différentes et alors on trouvera pour les autres corps des rapports différents de 20, ou bien ces causes sont identiques et alors la structure de la molécule chimique ne peut intervenir à aucun degré dans l'explication de la déviation du plan de polarisation observée dans les solutions.

SÉANCE DU 18 MAI 1894.

Présidence de M. de Romilly.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 4 mai est lu et adopté.

A propos du procès-verbal et de la Note de M. Van Aubel relative à la résistivité (résistance spécifique) de divers alliages, M. Hospitalier exprime le regret de voir ces résistivités exprimées tantôt en ohms-centimètre, tantôt en ohms $\frac{cm}{cm^2}$. Cette dernière expression est inexacte, car une résistivité est homogène au *produit* d'une résistance par une longueur et ne peut s'exprimer qu'en ohms-centimètre.

M. E. Hospitalier passe en revue les *Générateurs et transformateurs polymorphiques d'énergie électrique* qui prennent, depuis quelques années, une place si importante dans l'évolution actuelle des applications industrielles de l'électricité. Pour simplifier la question, on n'envisage, parmi les nombreuses variétés de l'énergie mécanique, que celle produite en exerçant un couple mécanique sur un arbre animé d'une vitesse angulaire constante, tandis que l'on considère les principales variétés de l'énergie électrique actuellement utilisées dans l'industrie, en se limitant à celles dans lesquelles l'hypothèse figurative de l'écoulement d'un courant dans un conducteur peut être directement appliquée, et en lais-

sant de côté, par suite, les phénomènes de grande fréquence et les ondulations hertziennes qui n'ont pas encore quitté le domaine de la science pure.

Ces variétés sont aujourd'hui au nombre de trois, différenciées par les trois facteurs essentiels de la circulation : force électromotrice, intensité et puissance, lorsque le régime normal et permanent est établi :

1° *Courant continu.* La force électromotrice, l'intensité et la puissance sont constantes. — 2° *Courants alternatifs simples.* La force électromotrice et l'intensité du courant varient périodiquement et changent de signe deux fois par période. La puissance est pulsatoire et périodique. — 3° *Courants alternatifs polyphasés.* Un certain nombre de courants alternatifs simples de même période, mais de phases différentes, combinés entre eux, représentent une série de puissances pulsatoires ou périodiques dont la somme est constante. Dans le cas de deux courants, on a des courants *diphasés;* dans le cas de trois courants, on a des courants *triphasés.*

Pour nous conformer aux définitions généralement admises, mais qui, il faut bien le reconnaître, sont fort vagues et insuffisantes, nous appelons *générateur* tout appareil qui, recevant de l'énergie d'une certaine espèce, produit, engendre de l'énergie d'une espèce différente, tandis que le mot *transformateur* s'applique aux appareils qui modifient, transforment une énergie d'une espèce donnée, mais en conservant cette espèce. On voit déjà l'insuffisance de cette terminologie, car le mot *générateur* devrait toujours être complété par deux autres, l'un indiquant ce qui engendre une espèce d'énergie, l'autre l'espèce d'énergie engendrée; de même, le mot *transformateur* devrait être accompagné des désignations relatives aux variétés génératrice et engendrée.

A défaut d'une terminologie plus méthodique, plus complète et plus exacte, nous nous risquons, bien timidement, à faire usage de quelques mots nouveaux qui ont tout au moins l'avantage de tirer leur origine de langues mortes et d'être formés d'éléments d'un emploi fréquent en science.

Nous appelons *générateurs polymorphiques* les appareils qui peuvent produire, successivement ou simultanément, l'énergie électrique sous plusieurs formes ou variétés, et *transformateurs polymorphiques* ceux qui, recevant l'énergie sous une certaine forme, la rendent sous une ou plusieurs formes différentes. En étendant cette terminologie, les générateurs et transformateurs ordinaires employés jusqu'à ces dernières années seraient des générateurs et des transformateurs *monomorphiques.*

Chacune des variétés de l'énergie électrique présente des qualités spéciales : le courant continu à basse tension convient aux moteurs et à la charge des accumulateurs; le courant alternatif simple au transport de l'énergie électrique à distance à haute tension et à sa transformation lorsque les appareils d'utilisation ne comportent ni accumulateurs, ni moteurs démarrant sous charge; les courants alternatifs diphasés et triphasés sont spécialement adaptés pour le transport de l'énergie à distance sous

puissance constante, à haut potentiel, et se prêtent facilement aux transformations sous forme de courant continu.

Pour profiter des avantages spéciaux que présente chacune des diverses formes de l'énergie électrique, il y a donc souvent intérêt, soit à combiner des générateurs produisant cette énergie sous plusieurs formes à la fois (générateurs polymorphiques), soit à transformer l'énergie électrique fournie sous une forme donnée en une ou plusieurs formes différentes de la forme initiale (transformateurs polymorphiques).

I. *Générateurs polymorphiques.* — C'est dans les laboratoires de Physique qu'il faut rechercher l'origine des générateurs polymorphiques d'énergie électrique. Les premières machines de Clarke et de Pixii étaient disposées pour fournir, sinon à la fois, du moins à volonté, soit des courants alternatifs, soit des courants redressés. M. J. Carpentier et M. Ducretet construisent encore des magnétos à bobine de Siemens avec lesquelles on obtient, par un simple déplacement des balais, l'énergie électrique sous la forme de courants redressés ou alternatifs. C'est seulement vers 1889 qu'a été réalisé pour la première fois par M. Elihu Thomson une dynamo industrielle donnant simultanément du courant continu et du courant alternatif.

La *Westinghouse Electric and Manufacturing C°* vient de terminer, pour la *Citizens' Light and Power C°* de Rochester, une dynamo polymorphique fournissant à la fois des courants continus et des courants alternatifs diphasés.

Cette dynamo à 8 pôles porte d'un côté de l'induit un collecteur où l'on recueille une différence de potentiel normale de 550^{volts}, et de l'autre côté de l'induit des bagues collectrices sur lesquelles on peut recueillir deux courants alternatifs diphasés de un quart de période au potentiel efficace de 385^{volts}, avec une fréquence de 50 périodes par seconde, l'induit tournant à la vitesse angulaire de 750 tours par minute.

C'est également parmi les générateurs polymorphiques qu'il convient de classer les dynamos Tesla de 750 kilowatts, construites et exposées par la même Compagnie à l'Exposition de Chicago, l'an dernier. Elles constituent, en effet, deux alternateurs distincts jumelés sur le même arbre, alimentant deux circuits séparés fournissant des courants alternatifs de même fréquence, mais diphasés de un quart de période, et pouvant être utilisés séparément ou simultanément, pour l'éclairage dans le premier cas, pour les moteurs à champ magnétique tournant dans le second.

C'est une solution analogue qui a été adoptée par le Creusot pour produire des courants alternatifs simples diphasés, solidaires ou indépendants dans l'installation faite aux mines de Decize. Deux alternateurs Zipernowsky identiques sont jumelés, montés sur un arbre unique et commandés par une courroie actionnant une poulie montée entre les deux couronnes d'inducteurs.

Enfin, en France, la Société l'*Éclairage électrique* établit une série de dynamos polymorphiques fournissant à la fois des courants continus et des courants alternatifs diphasés, pour des puissances variant entre

8 et 200 kilowatts, et de fréquences comprises entre 40 et 80 périodes par seconde.

II. *Transformateurs polymorphiques.* — Les quatre formes ou variétés d'énergie électrique actuellement appliquées dans l'industrie fournissent théoriquement, en se transformant les unes dans les autres, *seize* groupes de systèmes ou d'appareils, mais il n'y a lieu d'en considérer que *douze,* car quatre d'entre eux sont *monomorphiques,* en ce sens qu'ils transforment les qualités des courants : — tension, courant ou fréquence, — mais sans en modifier la forme. Ces quatre groupes sont : Pour les *courants continus,* les transformateurs rotatifs et les moteurs transformateurs; pour les *courants alternatifs simples,* les innombrables appareils désignés aujourd'hui sous le nom insuffisant de *transformateurs;* pour les *courants alternatifs diphasés,* les transformateurs à courants diphasés; pour les *courants alternatifs triphasés,* les transformateurs à courants triphasés. Tous ces appareils sont aujourd'hui trop connus pour qu'il y ait lieu d'insister. Les transformateurs *polymorphiques* (ou hétéromorphiques) constituent *douze* groupes en considérant successivement les appareils qui transforment chacune des quatre formes de l'énergie électrique en l'une quelconque des trois autres.

Dans tous ces transformateurs, dont la liste à peu près complète figure dans le Tableau ci-contre, on considère comme circuit *primaire* celui qui reçoit le courant à transformer, et comme circuit *secondaire* celui dans lequel se développe le courant transformé.

Dans certains appareils, le primaire et le secondaire forment un circuit unique; dans d'autres, au contraire, ils sont absolument distincts. Cette séparation des circuits est naturellement indispensable lorsque la transformation complexe porte à la fois et sur la forme du courant et sur ses qualités (tension, intensité, fréquence).

CLASSIFICATION DES GÉNÉRATEURS ET TRANSFORMATEURS POLYMORPHIQUES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

I. — Générateurs polymorphiques.

Courants continus et alternatifs	Premières machines de Pixii et de Clarke. Petites magnétos et dynamos d'enseignement. Dynamo-moteur-transformateur de l'Hélios (1887). Dynamo de mines de E. Thomson (1890).
Courants continus et alternatifs diphasés	Dynamos Schuckert (1891). Dynamos Westinghouse pour Rochester (1893). Dynamos de l'*Éclairage électrique* (1894).
Courants continus et alternatifs triphasés	Dynamos d'enseignement (Ducretet et Cadiot).
Courants alternatifs simples et diphasés	Dynamos Tesla-Westinghouse (1893). Dynamos jumelées du Creusot (1893).
Courants alternatifs simples et triphasés	Dynamos à courants triphasés avec montage en étoile et fil neutre.

II. — Transformateurs polymorphiques.

Forme du courant à transformer.	Forme du courant transformé.	Inventeurs. Appareils. Applications.
Courants continus..	*Courants alternatifs simples*...........	Onduleur Solignac (1887). Transformateur de l'Hélios (1887) Appareil de soudage des rails de E. Thomson (1893).
	Courants alternatifs diphasés..........	Appareil Schuckert (1891).
	Courants alternatifs triphasés.........	Appareil Dolivo-Dobrowolsky (1891). Appareil Hutin et Leblanc (1893).
Courants alternatifs simples..........	*Courants continus*...	Commutateur Gaulard (1884). Commutateur Lane-Fox (1887). Commutateur Pollak (1893). Transformateur de l'Hélios (1887)
	Courants alternatifs diphasés..........	Deux circuits à self-induction différente. Tesla (1887). — Self-induction et induction mutuelle. Ferraris (1888). — Self-induction et capacité. Boucherot (1890). Hutin et Leblanc (1891). — Moteur à induit fermé asynchrone avec inducteur à enroulements secondaires. Potier (1894).
	Courants alternatifs triphasés..........	Moteur à induit fermé asynchrone avec inducteur à enroulements secondaires. Potier (1894).
Courants alternatifs diphasés..........	*Courants continus*...	Schuckert (1891). Station centrale de Budapest (1893).
	Courants alternatifs simples............	Pas d'appareil spécial. Prendre des dérivations individuelles sur chacun des deux circuits.
	Courants alternatifs triphasés..........	Scott (1894).
Courants alternatifs triphasés.........	*Courants continus*...	Moteur-transformateur de Lahmeyer (1893). Appareil Hutin et Leblanc (1893).
	Courants alternatifs simples...........	Pas d'appareil spécial.
	Courants alternatifs diphasés..........	Scott (1894).

M. Hospitalier passe en revue ces douze groupes de transformateurs polymorphiques, en indiquant le principe sur lequel chacun d'eux est fondé.

M. Raoul Pictet annonce à la Société qu'il va installer à Paris un laboratoire dont l'ouverture aura lieu au mois d'octobre. Il a pu réaliser en grand des procédés permettant d'obtenir des températures extrêmement basses : dans ces conditions nouvelles une foule de recherches peuvent être entreprises; il serait heureux d'offrir l'hospitalité aux personnes qui désireraient travailler dans cette voie. Parmi les recherches qu'il poursuit lui-même, il signale, en particulier, l'étude du rayonnement d'un corps à température ordinaire placé dans une enceinte très froide; il fait remarquer le grand intérêt qu'il y a à connaître ces radiations de grande longueur d'onde et indique leurs curieuses propriétés, par exemple, la facilité avec laquelle elles traversent presque tous les corps.

SÉANCE DU 1er JUIN 1894.

Présidence de M. de Romilly.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 17 novembre est lu et adopté.

Sont élus membre de la Société :

MM. Bourgarel, Professeur au Lycée de Chambéry.
Ducotté, Directeur de l'Usine électrique du Casino municipal de Nice.

M. le Secrétaire général donne lecture d'une lettre où M. Van Aubel répond aux observations que MM. Guillaume et Hospitalier ont présentées relativement à sa dernière Communication. M. Van Aubel établit par des citations qu'il avait parfaitement connaissance des Mémoires cités par M. Guillaume, et c'est précisément par comparaison avec les résultats obtenus par les autres auteurs qu'il a conclu que la Kruppine a des propriétés qui la rendent très utile pour la fabrication des rhéostats industriels et que les alliages de la maison Heitmann, Witte et Cie possèdent des avantages de nature à les faire préférer à la manganine pour la confection des étalons. M. Van Aubel est parfaitement d'accord avec M. Hospitalier sur ce fait qu'une résistivité est homogène au produit d'une résistance par une longueur et par suite doit être exprimée en ohms-centimètre (le trait d'union entre les deux mots indiquant que l'ensemble exprime une grandeur physique); mais il croit correct et certainement très clair d'écrire *par abréviation* résistance électrique en ohms $\frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}$ au lieu de *résistance électrique en ohms d'un fil ayant* $0^{\text{m}},01$ *de long et* $0^{\text{mq}},01$ *de section*.

M. le Secrétaire général annonce que le Ministre de la Guerre vient d'adresser à la Société la collection complète du *Mémorial des Poudres et Salpêtres* (Tomes I à VI).

M. le Professeur W. Holtz adresse à la Société de Physique une Note au sujet de la machine Bonetti présentée à la séance du 16 février par M. d'Arsonval. Dans cette Note M. Holtz revendique la priorité de cette invention et indique qu'il a complètement décrit cette machine, il y a longtemps (*Poggendorff Annalen*, t. 130, p. 128 et p. 168; t. 136, p. 171; t. 8 supplémentaire, p. 407; et *Centralblatt für Elektrotechnik* de Uppenborn, 1883, p. 686).

M. Holtz revendique également l'invention de la machine de Wimshurst : les secteurs et les balais ayant été déjà employés et décrits par lui avant les publications de M. Wimshurst (*Poggendorff Annalen*, t. 8, supplémentaire, p. 407; *Centralblatt für Elektrotechnik Uppenborn*, 1891, p. 199). M. Holtz est d'ailleurs d'accord avec M. Bonetti pour reconnaître que l'emploi des secteurs ne fait que nuire au débit de la machine.

A propos du procès-verbal et de la récente Communication de M. Hospitalier, M. Violle ne pense pas que le mot « diphasé » doive remplacer « biphasé », qui lui semble pouvoir être conservé.

M. H. Abraham reprend l'étude du pont de Wheatstone à téléphone où circulent des courants sinusoïdaux de fréquence π.

Les deux conditions connues de l'équilibre sont

$$L_1 R_4 + L_4 R_1 = L_2 R_3 + L_3 R_2,$$
$$R_1 R_4 - R_2 R_3 = 4\pi^2 n^2 (L_1 L_4 - L_2 L_3).$$

Si l'on ne veut agir que sur une seule résistance, R_4, on ne peut pas, en général, réduire le téléphone au silence; toutefois, si l'on est au voisinage de l'extinction, le son passe par un minimum très net, qui correspond à la condition

$$R_1 [R_1 R_4 - R_2 R_3 - 4\pi^2 n^2 (L_1 L_4 - L_2 L_3)] + 4\pi^2 n^2 L_1 (L_1 R_4 + L_4 R_1 - L_3 R_2 - L_2 R_3) = 0.$$

L'auteur étudie deux cas particuliers importants :

Premier cas. L'une des branches est sans induction ($L_1 = 0$). On doit réaliser approximativement le réglage préalable $L_4 R_1 = L_2 R_3 + L_3 R_2$.

Le minimum de son se produit alors pour un *déréglage* de la résistance R_4 égal à

$$r = 4\pi^2 \frac{L_2 L_3}{R_1} n^2.$$

Cette formule montre que la mesure du déréglage r peut servir à déterminer en valeur absolue la moyenne des coefficients d'induction propre $L_2 L_3$.

Comme contrôle expérimental, on pouvait comparer les valeurs véri-

tables des fréquences avec celles que l'on déduirait de ectte formule; on a trouvé par exemple :

n vrai.	n calculé.
3000	3008
4500	4504
5250	5248
6000	5992

Le *deuxième cas* signalé est celui où l'on fait $L_3 = L_4 = 0$. L'expérience a alors pour objet la comparaison des deux coefficients d'induction propre L_1 et L_2.

L'équilibre parfait ne pourrait être obtenu que pour

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2};$$

mais, si l'on est au voisinage de ce réglage, le son atteint son minimum lorsque l'on a

$$R_1(R_1 R_4 - R_2 R_3) + 4\pi^2 n^2 L_1(L_1 R_4 - L_2 R_3) = 0.$$

En sorte que si r représente encore le déréglage du pont, en désignant par ε ce qu'il faudrait retrancher à R_4 pour que cette résistance fût à R_3 comme L_2 est à L_1, la correction ε a pour valeur

$$\varepsilon = \frac{R_1^2}{4\pi^2 n^2 L^2}\, r.$$

Pour des fréquences assez élevées, la correction ε peut, souvent, être négligée. L'auteur en donne un exemple numérique.

L'alternateur est une sorte de machine de Page : une roue portant 40 petits barreaux de fer tourne devant un aimant de téléphone garni de ses bobines et y induit des courants alternatifs qui arrivent à 6000 alternances lorsque la roue tourne à raison de 150 tours par seconde. Cette vitesse est réglée et mesurée par un procédé stroboscopique.

L'auteur conclut en attirant l'attention sur ce point que les lois ordinaires de l'induction lui ont permis de calculer exactement ses expériences, avec des courants alternatifs atteignant 6000 fréquences par seconde, à la condition que l'on se fût affranchi des *capacités* parasites qu'auraient entraînées de longs enroulements de fil fin employés comme bobines d'induction ou comme résistances mortes.

M. Mergier fait observer qu'au cours de mesures qu'il a faites par la méthode de Kohlrausch, il a eu l'occasion de se servir d'une machine du type Page qu'il avait fait construire dans ce but. Cette machine, il est vrai, n'est pas comparable à l'appareil dont s'est servi M. Abraham, en ce qui concerne les dimensions, mais à part cela elle donne des courants de

même ordre. Elle est formée d'une roue en bronze d'environ $0^m,40$ de diamètre, munie à sa périphérie de 20 barreaux de fer doux placés à une distance les uns des autres sensiblement égale à la largeur des barreaux eux-mêmes. Cette roue, mise en mouvement à l'aide d'un moteur électrique d'un cheval, pouvait donner environ 2000 alternances par seconde. Ce dispositif n'a pas donné de résultats sensiblement plus satisfaisants que ceux obtenus à l'aide d'une bobine de Ruhmkorff (appareil à chariot de du Bois-Reymond) fonctionnant à l'aide d'une petite lame vibrante donnant de 800 à 900 interruptions par seconde.

En ce qui concerne les mesures de résistances effectuées sur les liquides, les courants obtenus avec l'un et l'autre de ces appareils ont donné le silence absolu dans le téléphone, grâce à l'usage des résistances métalliques à enroulement parallèle présentées à la Société en juillet dernier.

Mais, en ce qui concerne les mesures de résistance électrique qu'il a voulu faire sur le corps humain (car c'était là le but final de tous les essais précédents), le silence n'a pas été plus obtenu avec les courants de la machine Page qu'avec ceux de l'appareil de du Bois-Reymond.

D'ailleurs il faut dire que les courants fournis par une machine du type Page ne sont pas sinusoïdaux. On peut remarquer, par exemple, que, l'aimantation et la désaimantation du fer doux n'ayant pas la même durée, les deux ondes + et — ne sauraient avoir la même forme.

Sur l'affirmation de M. Mergier que « *les courants fournis par une machine du type Page ne sont pas sinusoïdaux* », M. Abraham explique que les expériences dont il vient de rendre compte montrent, précisément, que les courants obtenus étaient presque sinusoïdaux et contenaient fort peu d'harmoniques supérieurs.

Expériences de M. Lenard *sur les rayons cathodiques.* — Les phénomènes lumineux que l'on observe dans des tubes de Geissler sous très faible pression avaient été attribués par M. Crookes à une sorte de bombardement moléculaire; et, bien que cette théorie présentât quelques contradictions apparentes, il n'était pas absolument démontré qu'elle fût erronée. Les expériences de M. Lenard, dont M. Guillaume donne la description, ne laissent plus aucun doute sur ce point.

Jusqu'ici les *rayons cathodiques* n'avaient pas été observés dans des conditions différentes de celles de leur production, de telle sorte que certaines de leurs particularités inhérentes à leur espèce avaient été attribuées au milieu. Le propre des expériences de M. Lenard est d'avoir complètement séparé la propagation des rayons des conditions de leur production. Le tube dans lequel ils sont engendrés est fermé par une capsule métallique dont la partie centrale est formée par une feuille d'aluminium très mince. Les rayons cathodiques la traversent et peuvent être observés sous la pression atmosphérique. On peut du reste les séparer de toute action électrique en les faisant pénétrer dans une boîte métallique complètement fermée, où on les fait agir directement sur une plaque sensible. On déter-

mine aisément leur trajet en les recevant sur un papier imprégné de pentadécylparatolylcétone. On observe ainsi que l'air agit sur eux à la manière d'un milieu trouble. Les expériences peuvent être faites dans différents gaz en adaptant à l'extrémité du tube producteur un autre tube fermé également par une mince feuille de métal, les deux feuilles étant en regard l'une de l'autre. En observant ainsi la projection lumineuse de l'ouverture circulaire d'un écran, on trouve que les milieux gazeux diffusent les rayons cathodiques proportionnellement à leur densité, et sans aucune action sélective. Les corps solides ne présentent pas de différences évidentes quant à leur transparence. Les rayons, qui ne peuvent pas être engendrés dans le vide parfait, y pénètrent, et s'y propagent avec la plus grande facilité. Les rayons cathodiques ne sont pas tous identiques; leur diffusibilité augmente en même temps que la pression dans le tube producteur; ils sont déviés par l'aimant indépendamment du milieu, et d'autant plus qu'ils se diffusent davantage. M. Lenard les attribue à des oscillations de l'éther analogues à celles qui produisent la lumière; elles forment un spectre dont le champ magnétique est en quelque sorte le prisme; le fait que les gaz agissent sur eux comme un milieu trouble montre que ces oscillations sont extrêmement courtes.

M. Curie a vu quelques-uns des phénomènes décrits par M. Lenard. M. de Kowalski avait en effet commencé cet hiver, à l'École de Physique, des recherches sur la nature des rayons cathodiques et il était déjà arrivé à des résultats fort intéressants quand a paru le travail très complet de M. Lenard sur cette question. L'action de l'aimant est frappante et il suffit d'un champ uniforme faible pour produire des effets énergiques. A-t-on affaire à une sorte de courant électrique ou à une sorte de radiation analogue à la lumière? Cette dernière hypothèse semble la seule vraisemblable aujourd'hui; mais n'est-ce pas une lumière bien étrange que celle sur laquelle l'aimant agit comme sur un courant électrique? M. Curie s'est d'abord demandé si ces radiations cathodiques étaient douées d'une dissymétrie particulière qui n'existe pas dans la lumière ordinaire. Mais, en admettant qu'un rayon lumineux ordinaire a la même symétrie que celle d'un milieu matériel où se propagent des vibrations transversales, on trouve que cette symétrie très particulière du rayon de lumière est inférieure à celle du courant électrique. La lumière aurait donc une dissymétrie aussi grande que celle des rayons cathodiques, mais une partie de cette dissymétrie serait seulement révélée par les phénomènes actuellement connus.

La loi du retour inverse des rayons lumineux n'est pas applicable aux radiations cathodiques se propageant normalement à un champ magnétique. C'est là un indice certain de dissymétrie. Il convient de remarquer que, même avec la lumière ordinaire, la loi du retour inverse n'est pas absolue puisqu'elle ne se vérifie pas lorsque l'on a le phénomène de la polarisation rotatoire magnétique.

M. VIOLLE présente à la Société un baromètre construit par M. HÉMOT : l'échelle, tracée sur le tube, fait connaître immédiatement la hauteur du mercure, car les divisions ont été réduites de façon à tenir compte du changement de niveau dans la cuvette, et le zéro a été mis en place au moyen d'un baromètre normal; le curseur à vernier permet de viser exactement le sommet de la colonne. A côté du tube barométrique est placé un correcteur de la température, sorte de thermomètre dont les divisions, largement espacées, représentent les dixièmes de millimètre que l'on devra retrancher de la hauteur observée si on veut la réduire à zéro. La correction, établie par la pression moyenne de 760^{mm}, est encore exacte à 85^{mm} près pour des pressions inférieures ou supérieures de 25^{mm}; au delà une simple proportion fournirait le nombre exact. L'appareil donne donc très aisément et très rapidement la pression barométrique exacte à un dixième de millimètre près.

M. GRÉHANT fait une Communication sur le chauffage et la ventilation. A l'aide d'un grisoumètre convenablement modifié et dont il montrera le fonctionnement dans une prochaine séance, il a pu doser l'oxyde de carbone même en très faible quantité; c'est ainsi qu'il a étudié l'absorption de ce gaz si délétère par le sang d'animaux placés au voisinage de divers appareils de chauffage et dans des conditions différentes de ventilation. Un brasero, par exemple, est inoffensif en plein air, il devient très dangereux, au contraire, dans une salle fermée quelque vaste qu'elle soit; si l'on se contentait d'aspirer les gaz qui se dégagent vers l'axe du foyer, on trouverait un résultat tout à fait erroné : les produits de la combustion sont souvent refoulés vers le bas, comme on le voit en projetant sur les charbons ardents du sel ammoniac dont les vapeurs rendent visibles les colonnes gazeuses; une hotte est tout à fait insuffisante pour provoquer un tirage efficace, on doit complètement renoncer à ce genre d'appareils : il faut entourer tous les braseros d'un cylindre de tôle, où l'on a ménagé une assez petite ouverture d'admission de l'air pour être à l'abri de toute intoxication.

Les courants alternatifs de grande fréquence et le pont de Wheatstone,

PAR M. H. ABRAHAM.

1. Soient $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$ les quatre branches d'un pont de Wheatstone à téléphone, où circulent des courants sinusoïdaux ayant n périodes par seconde.

Le courant du téléphone est sinusoïdal, et le carré de l'intensité

maximum a pour valeur

$$(1)\quad \frac{[R_1R_4 - R_2R_3 - 4\pi^2n^2(L_1L_4 - L_2L_3)]^2 + 4\pi^2n^2(L_1R_4 + L_4R_1 - L_2R_3 - L_3R_2)^2}{\Delta},$$

où Δ est une quantité positive assez complexe qui ne peut jamais s'annuler.

Le téléphone ne restera absolument silencieux que si l'expression précédente est nulle, ce qui exige les *deux* conditions connues

$$L_1R_4 + L_4R_1 = L_2R_3 + L_3R_2,$$
$$R_1R_4 - R_2R_3 = 4\pi^2n^2(L_1L_4 - L_2L_3).$$

Il faut donc agir sur *deux* variables pour obtenir le silence. Si l'on n'agit que sur l'un des éléments du pont, si l'on fait varier R_4, par exemple, on n'arrive pas, en général, à l'extinction, mais le son passe par un minimum d'intensité.

Toutefois, si les conditions d'équilibre sont *à peu près* réalisées, ce minimum est à la fois très faible et très net, et il correspond à une équation qu'il est facile d'obtenir.

Puisque le numérateur de (1) est presque nul, le minimum cherché se produit presque exactement en même temps que le minimum du numérateur. En annulant la dérivée par rapport à la variable R_4, nous obtenons la condition générale

$$R_1[R_1R_4 - R_2R_3 - 4\pi^2n^2(L_1L_4 - L_2L_3)]$$
$$+ 4\pi^2n^2L_1(L_1R_4 + L_4R_1 - L_2R_3 - L_3R_2) = 0.$$

Toutes ces formules se simplifient lorsque le coefficient d'induction L_1 est nul.

Faisant $L_1 = 0$ dans les conditions d'équilibre, nous trouvons

$$(2)\quad L_4R_1 = L_2R_3 + L_3R_2,$$
$$(3)\quad R_2R_3 - R_1R_4 = 4\pi^2n^2L_2L_3,$$

tandis que la condition de minimum devient

$$(4)\quad R_2R_3 - R_1R_4 = 4\pi^2n^2L_2L_3.$$

Nous pouvons alors constater que *la variable* R_4 *n'entre pas dans l'équation* (2), et que les équations (3) et (4) sont identiques.

Ceci nous montre, en premier lieu, que l'une des conditions

d'équilibre (2) peut être réalisée *par un réglage préalable* qui demeure inaltéré lorsqu'on modifie la résistance variable R_4.

En second lieu, nous voyons qu'il est inutile de satisfaire exactement à cette équation (2). Que le réglage préalable soit parfait ou seulement approché, c'est, en effet, la même équation qui correspond soit à l'extinction, soit au minimum de son dans le téléphone.

Cette équation (3 ou 4) peut se mettre sous la forme

$$r = \frac{4\pi^2 L_2 L_3}{R_1} n^2,$$

en désignant par r la résistance qu'il faudrait ajouter à R_4 pour rétablir l'équilibre en courants continus.

Si donc, le *réglage préalable* est réalisé, ou à peu près, l'équilibre en courants alternatifs diffère de l'équilibre en courants continus *par un déréglage r proportionnel au carré de la fréquence*. Si d'ailleurs les éléments du pont sont connus, *la mesure du déréglage permet de calculer la fréquence des alternances*.

2. Je me suis proposé, en particulier, de contrôler expérimentalement ces deux propositions.

L'alternateur dont je me sers fournit jusqu'à 12000 alternances par seconde (6000 périodes). Devant un aimant de téléphone Ader garni de ses bobines, défilent très rapidement des petits barreaux de fer dont le passage induit une force électromotrice périodique dans les bobines fixes. Les barreaux, au nombre de 40, sont fixés par leurs extrémités sur les circonférences de deux roues parallèles calées sur le même axe. Cette sorte de cage cylindrique, grande de quelques centimètres, peut tourner à raison de 150 tours par seconde. La vitesse de rotation est réglée et mesurée avec précision par les procédés stroboscopiques ordinaires ([1]).

Les courants obtenus sont assez intenses pour exciter dans un téléphone récepteur un son qui se fait entendre à plusieurs mètres de distance.

([1]) Pour les courants dont la période est plus longue que $\frac{1}{1000}$ de seconde, on peut remplacer la roue à barreaux par un diapason.

J'ajoute que, lorsque le réglage est atteint, l'extinction du son dans le téléphone est presque complète. Cela montre que les courants sont presque sinusoïdaux, car le pont de Wheatstone *analyse le courant*. Le réglage qui donne l'extinction du *son* fondamental est sans effet sensible sur les harmoniques supérieurs qui passent seuls dans le téléphone.

Nous donnerons les résultats d'une série de mesures pour lesquelles on avait fait $R_1 = 140^{ohms},6$; $L_2 = L_3 = 0^{henry},00908$. On devait avoir

$$n = 207,8\sqrt{r},$$

et voici les valeurs ainsi calculées pour n, en regard du nombre réel des périodes :

n_{vrai}.	$n_{calculé}$.
6000	5992
5250	5248
4500	4504
3000	3008

Donnons encore une série un peu moins bonne. On a

$$R_1 = 149^{ohms},5, \qquad L_2 = L_3 = 0^{henry},00908.$$

La formule donnerait

$$n = 214,3\sqrt{r};$$

on trouve

n_{vrai}.	$n_{calculé}$.
1500	1497
2250	2257
3000	2986
3750	3722

MESURES DE COEFFICIENTS D'INDUCTION PROPRE.

3. Mesures absolues. — Avec des courants alternatifs de fréquence donnée, la mesure du déréglage r fait connaître la moyenne géométrique des coefficients L_2, L_3 en valeur absolue, ou du moins par comparaison avec une résistance et un temps

$$\sqrt{L_2 L_3} = \frac{1}{2\pi n}\sqrt{rR}.$$

Mesures relatives. — L'observation du son minimum dans le téléphone du pont est un moyen commode de comparer des coefficients d'induction propre très faibles.

Nous partirons de la disposition classique de Maxwell. Plaçons les bobines à comparer dans les branches 1 et 2 du pont et laissons sans induction les branches opposées. Le téléphone sera muet, aussi bien pour les courants alternatifs que pour les courants continus si l'on a réalisé *exactement* le double réglage

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Mais si l'on cherche seulement un *minimum* de son nettement accusé, il suffit d'être *au voisinage* de ce réglage.

Le condition générale de minimum

$$R_1[R_1R_4 - R_2R_3 - 4\pi^2n^2(L_1L_4 - L_2L_3)] \\ + 4\pi^2n^2L_1(L_1R_4 + L_4R_1 - L_2R_3 - L_3R_2) = 0,$$

devient, dans le cas actuel ($L_3 = L_4 = 0$),

$$R_1(R_1R_4 - R_2R_3) + 4\pi^2n^2(L_1R_4 - L_2R_3) = 0.$$

Désignons encore par r le déréglage observé, c'est-à-dire ce qu'il faudrait *ajouter* algébriquement à R_4 pour retrouver l'équilibre en courants continus. Soit, de même, ε ce qu'il faudrait *retrancher* algébriquement de R_4 pour que cette résistance fût à R_3 comme L_2 est à L_1. Avec ces notations, l'équation précédente peut s'écrire

$$\varepsilon = \frac{R_1^2}{4\pi^2n^2L_1^2}r.$$

Ce qui fait le succès de la méthode, c'est que, pour des alternances assez rapides, cette valeur de ε est presque nulle. Cela veut dire que, pour des courants alternatifs de grande fréquence :

Le rapport $L_2 : L_1$ *que l'on cherche est presque exactement égal au rapport* $R_4 : R_3$ *qui donne le son minimum dans le téléphone, même si le déréglage est considérable.*

Lorsqu'on a une connaissance approchée de la valeur de L_1, l'expression trouvée pour ε fournit la correction complémentaire. Il est ensuite intéressant de contrôler la mesure, en la répétant

avec des résistances R_1 et R_2 qui soient, maintenant, dans le rapport de R_3 à $R_4 - \varepsilon$.

Voici une mesure pour laquelle il n'était pas nécessaire de tenir compte de la correction ε.

On avait environ $R_1 = 8^{\text{ohms}}$, $L_1 = 0^{\text{henry}},017$, et l'on employait des courants à 2500 périodes. Avec R_1 et R_3 constants, on prend d'abord pour R_2 une résistance *quelconque* de 200^{ohms}. Le son minimum est obtenu pour

$$R_4 = 608^{\text{ohms}},3(\pm 0^{\text{ohm}},2),$$

alors que l'équilibre en courants continus demande

$$R_4 + r = 520^{\text{ohms}},0.$$

Malgré ce déréglage énorme, la correction, $\varepsilon = -0^{\text{ohm}},1$, n'atteint pas l'incertitude de la mesure. Si, d'ailleurs, on se rapproche beaucoup plus du réglage parfait, on trouve, par exemple, en courants continus, $R_4 + r = 610^{\text{ohms}},8$; mais, en courants alternatifs, la valeur de R_4 reste la même :

$$R_4 = 608^{\text{ohms}},6(\pm 0,2).$$

Ces mesures sont susceptibles d'un contrôle.

A une même bobine γ on compare successivement deux bobines α et β, puis la combinaison $\alpha + \beta$. En prenant L_γ pour unité, on trouve

$$L_\alpha = 0,0889, \qquad L_\beta = 0,0872,$$

d'où l'on déduit

$$L_\alpha + L_\beta = 0,1761,$$

tandis que la mesure directe donne

$$L_\alpha + L_\beta = 0,1765.$$

Comme les coefficients d'induction propre n'entrent dans les formules que multipliés par la fréquence, la méthode des grandes fréquences, que nous signalons, est particulièrement propre à l'étude des inductions très faibles. C'est ainsi que l'expérience rapportée ci-dessus permet de fixer à quelques millièmes près la valeur de L_β qui n'est, pourtant, que de

$$0^{\text{henry}},000793.$$

4. Remarques sur la capacité des bobines. — A mesure que la fréquence s'élève on commence à observer une influence très nette de la *capacité* des bobines.

Les bobines semblent se comporter comme si elles possédaient une capacité en dérivation. Pour une fréquence donnée elles agissent donc comme un fil sans capacité dont la résistance serait

$$\rho = \frac{R}{(1 - a^2CL)^2 + a^2C^2R^2} \qquad (a = 2n\pi),$$

et le coefficient d'induction propre

$$\lambda = \frac{L - C(R^2 + a^2L^2)}{(1 - a^2CL)^2 + a^2C^2R^2}.$$

La manière dont varient les constantes apparentes de la bobine quand la fréquence augmente permet de se faire une idée de ces capacités parasites.

Mais ces variations relatives sont toujours de l'ordre de a^2CL ou de $a^2C^2R^2$. On peut donc, dans chaque expérience, s'affranchir complètement de cette cause d'erreur *en opérant sur des bobines dont le coefficient d'induction, la résistance et les dimensions géométriques sont d'autant plus faibles que la fréquence est plus élevée.*

SÉANCE DU 15 JUIN 1894.

Présidence de M. Joubert.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 1er juin est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. Darzens, Préparateur de Chimie à l'École Polytechnique.
Maltézos, Docteur ès Sciences à Paris.
Müller, Chef des Travaux chimiques à la Faculté des Sciences de Nancy.

M. le Président donne lecture d'une lettre du Ministre de l'Instruction publique et des Beaux-Arts annonçant que le 33e Congrès des Sociétés savantes est fixé dès maintenant au mardi 16 avril 1895. — Cette lettre est accompagnée de l'envoi du programme des questions soumises à l'étude par le Congrès. Le Ministre invite les Membres de la Société à adresser

les documents traitant des études inscrites au programme le 1[er] février au plus tard.

M. le Président annonce ensuite que l'Association française pour l'avancement des Sciences tiendra son 23[e] Congrès à Caen du 9 au 15 août. La Société désignera un de ses membres pour la représenter à ce Congrès.

M. le Président donne lecture de la lettre suivante :

Monsieur le Président,

Ne pouvant assister ce soir à la séance de la Société de Physique, je vous prie de vouloir bien faire connaître la rectification suivante au procès-verbal de la dernière séance, relativement à l'observation que j'ai faite sur les expériences de M. Abraham.

En ce qui concerne la machine du type Page dont je me suis servi, au lieu de : 2000 *alternances* par seconde, lire : 2000 *vibrations simples*.

De même, au sujet de la lame vibrante qui commandait la bobine de Ruhmkorff dont j'ai fait usage, il s'agit de 800 à 900 *vibrations simples*, c'est-à-dire de 400 à 450 *interruptions* par seconde.

Il y a de ma part, pour l'un et l'autre cas, une erreur d'interprétation de notes.

Je suis donc toujours resté dans mes mesures, à un nombre d'alternances très inférieur à celui dont s'est servi M. Abraham dans ses intéressantes expériences.

Veuillez agréer, etc.,

Mergier.

M. Jules Lemoine dit que M. Abraham obtenait, non pas 2000, mais 6000 périodes par seconde avec une roue de $0^m,30$ de rayon tournant à 150 tours par seconde.

Pour atteindre une fréquence égale à 1000, l'alternateur de M. Mergier fournirait 50 tours par seconde. C'est une grande vitesse, étant donnés le grand diamètre ($0^m,40$) de sa roue et le poids considérable des chevilles en fer. Il serait intéressant d'avoir des renseignements complémentaires sur les précautions à prendre pour obtenir facilement cette vitesse dans les laboratoires.

On peut rappeler que l'alternateur Tesla tournait à 50 tours par seconde ainsi qu'un alternateur de M. d'Arsonval sans fer doux dans l'induit.

M. l'abbé de Joannis présente au nom du P. Dechevrens un nouvel appareil pour tracer les courbes. — Dans la séance du 20 avril dernier, M. Clementisch de Engelmeyer a présenté à la Société un *cinégraphe* de son invention destiné à montrer la composition de deux mouvements. Le présent appareil, inventé déjà depuis quelque temps, devait porter ce nom, mais pour le distinguer du précédent avec lequel il n'a, on peut le dire, rien de commun, l'auteur propose de le nommer *campylographe* (du mot grec qui signifie *courbe*).

Cet appareil, dont le P. Dechevrens ne donne aujourd'hui qu'une description sommaire, permet tout d'abord, de même que celui de M. Rohn pré-

senté à la Société en 1891, de décrire les courbes dites *de Lissajous;* mais il est combiné de façon à donner en outre plusieurs séries de courbes curieuses résultant de la combinaison de plusieurs mouvements circulaires.

Le campylographe se compose essentiellement de deux couples de roues égales deux à deux, situées sur deux droites rectangulaires et engrenant avec une circonférence centrale. Chaque couple porte une bielle fixée aux extrémités de deux rayons parallèles. L'intersection des deux bielles porte un crayon qui décrit la courbe; c'est la même disposition que celle de M. Rohn : le P. Dechevrens l'avait réalisée en même temps que celui-ci, mais fut prévenu par lui pour la publication.

M. Decœur fait une communication *Sur le bélier hydraulique.* — On sait qu'en terminant une conduite d'eau par une cloche à air on évite l'action destructive des chocs dus à de brusques fermetures de l'orifice d'écoulement. La machine élévatoire connue sous le nom de *bélier hydraulique* s'obtient en ajoutant à la cloche un clapet de retenue et un tuyau de refoulement, et en plaçant sur l'orifice d'échappement une soupape oscillante.

Quand la soupape, poussée par le courant, s'applique sur son siège, l'eau en mouvement soulève le clapet et passe dans la cloche en pressant le matelas d'air, qui la refoule avec une vitesse à peu près uniforme dans le tuyau d'ascension.

Après l'épuisement de la force vive, le clapet s'abaisse, et, la soupape ouvrant à nouveau l'orifice d'échappement, le courant reprend sa vitesse.

En appelant

l la longueur de la conduite,
t la durée de l'échappement,
t' celle du refoulement,
v la vitesse acquise au moment du battement de la soupape,
$(h-\varepsilon)$ la chute motrice diminuée de la perte de charge due aux frottements et de la hauteur correspondante à la vitesse perdue à la sortie,
$(h'+\varepsilon')$ la hauteur d'élévation augmentée des mêmes pertes de charge,

on a approximativement

$$\frac{l}{g}v = (h-\varepsilon)t = (h'+\varepsilon')t'.$$

En négligeant la perte de travail due à l'inertie de l'eau à déplacer autour des soupapes, et la perte de temps due au mouvement de recul qui peut se produire dans la conduite après chaque pulsation, on aurait, pour le rapport de l'eau montée à l'eau perdue,

$$\frac{t'}{t} = \frac{h-\varepsilon}{h'+\varepsilon'},$$

et pour la durée d'une oscillation

$$t + t' = \frac{l}{g} v \left(\frac{1}{h - \varepsilon} \right) + \frac{1}{h + \varepsilon},$$

v étant le double de la vitesse moyenne correspondante au débit de la source.

Le rendement serait parfait, si les pertes de charge étaient négligeables par rapport à h et h'.

On peut les diminuer en employant un tuyau de batterie lisse, sans coudes brusques, et bien évasé aux extrémités. On peut aussi, dans de certaines limites, réduire la longueur de ce tuyau, pour diminuer les frottements. Mais on augmente alors le nombre des battements, et par suite l'importance relative des pertes de force vive dues aux remous, aux chocs des soupapes sur leurs sièges et à l'inertie de l'eau à déplacer pour l'écoulement alternatif dans le bassin inférieur et dans la cloche.

Dans les nouveaux types de bélier qui sont présentés, on a cherché à éviter ces pertes, en faisant arriver l'eau à faible vitesse autour de la soupape et en dirigeant le courant vers les clapets de refoulement, placés le plus près possible de l'échappement.

Ces clapets, en nombre variable suivant la grandeur des appareils, sont bien rodés sur leurs sièges. Ils ont peu de masse et un bombement qui facilite leur soulèvement. De petits ressorts à boudin, poussés par un buttoir vissé sur une tige centrale, précipitent leur descente et évitent les retours d'eau dans le cas des grandes pressions au refoulement.

La soupape est commandée par des ressorts réglables en marche et permettant d'augmenter l'amplitude et la durée des oscillations proportionnellement à la quantité d'eau à dépenser.

Dans le type pour petits débits (mis en expérience dans la cour, avec l'eau de la ville), cette soupape a la forme d'une calotte sphérique. L'échappement se fait dans un tuyau, avec coude plongeant dans le bassin inférieur, ce qui permet de placer le bélier à une hauteur quelconque, la conduite d'eau étant terminée par un raccord en contrepente évitant les rentrées d'air. Cette disposition présente un double avantage. Le conduit d'échappement formant siphon assure l'utilisation de toute la chute disponible en basses eaux; et l'entretien du matelas élastique dans la cloche peut se faire, sans reniflard, par l'air aspiré autour de la tige de la soupape. Cet air remonte dans la chambre de compression, amortit les chocs, et passe dans la cloche à chaque pulsation. L'excès s'échappe par un bouchon à vis placé au-dessus de l'origine de la conduite de refoulement. On peut d'ailleurs éviter une trop grande aspiration d'air en plaçant le bélier dans une cuvette de hauteur suffisante pour noyer la douille à vis, contre laquelle butte le ressort limitant la course de la soupape.

On règle le débit en enfonçant plus ou moins cette douille dans le conduit d'échappement.

Pour de grands débits on réduit la longueur de la conduite et le

poids du bélier en employant une soupape annulaire de grand diamètre, se mouvant de bas en haut dans une boîte à grille placée sur le coude d'arrivée de l'eau. Cette soupape équilibrée supporte une moindre pression d'eau et n'exige pas des ressorts de grande force. Sa faible course permet une marche à pulsations rapides. L'appareil étant noyé, l'entretien du matelas d'air dans la cloche se fait, au besoin, avec un petit bélier placé hors de l'eau.

MM. Rouart frères et Cie construisent ces appareils pour des conduites de dimensions quelconques. Ils refoulent en moyenne $\frac{1}{3}$ de l'eau de la source à 2 fois et demie la hauteur de chute, $\frac{1}{8}$ à 5 fois la chute, $\frac{1}{10}$ à 8 fois la chute. Le rendement diminue quand la hauteur d'élévation augmente. Dans les applications ordinaires on obtient le maximum du rendement quand la source est à son minimum de débit, la vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite étant d'environ $0^m,20$.

M. Pellat présente, au nom de M. A. Sandoz, un banc d'optique pour l'étude de la vision. Un des avantages de cet appareil est de pouvoir utiliser pour les démonstrations tous les verres d'une boîte d'optique, ce qui permet de réaliser un très grand nombre de combinaisons.

L'appareil qu'il a fait construire par M. Pellin pour le laboratoire des travaux pratiques de Physique de la Faculté de Médecine donne aux élèves le moyen de se rendre compte des différentes anomalies de la vision et de les corriger. Il peut aussi servir à vérifier expérimentalement tous les dispositifs réalisés dans les instruments d'optique : loupe, microscope, etc.

L'appareil se compose d'un banc d'optique d'une longueur de $1^m,80$ sur lequel glissent des patins portant les pièces suivantes : 1° un œil artificiel; 2° un disque muni de lentilles pour l'accommodation; 3° un disque optométrique pour la correction; 4° un miroir percé d'un trou pour l'ophtalmoscope.

L'appareil permet facilement de donner la théorie de l'ophtalmoscope et celle de la méthode de l'ombre pupillaire.

M. Pellat félicite M. Sandoz d'avoir fait construire un appareil aussi utile pour l'enseignement.

Le campylographe;

Par le P. Marc Dechevrens.

Dans la séance du 20 avril dernier la Société de Physique a entendu une Communication de M. Clementitch de Engelmeyer, relative à un cinégraphe de son invention, destiné à démontrer la

composition de deux mouvements. Cet appareil ingénieux laisse entier, je crois, l'intérêt qui peut s'attacher à un instrument analogue dont je ne donnerai pour le moment qu'une très rapide description, me réservant d'en perfectionner le mécanisme avant de procéder à sa construction définitive. Je produirai cependant, dès aujourd'hui, d'assez curieux spécimens de ce qu'il prétend réaliser. Je l'avais aussi baptisé du nom de *cinégraphe,* parce qu'il donne la composition de deux, de trois, de quatre et même de cinq mouvements différents dans un même plan. Mais son incroyable fécondité en courbes de tous genres et presque de tous les degrés, courbes algébriques et courbes transcendantes, a paru si caractéristique qu'on m'a engagé à lui donner un nom qui rappelât avant tout cette singulière propriété, et je me suis arrêté à celui de *campylographe,* de l'adjectif grec καμπύλος qui signifie *courbe.*

Le campylographe, en effet, dessine avec une égale facilité et d'un mouvement continu la ligne droite, le cercle, l'ellipse, la parabole et toutes les autres courbes dites de *Lissajous* qui sont la résultante de deux mouvements vibratoires rectangulaires. Ce qui ne s'obtient qu'avec peine et qu'après beaucoup de tâtonnements avec les méthodes classiques des verges ou des diapasons croisés, les variations d'amplitude, les variations de vitesse et les différences de phases initiales, est fait en un tour de main dans le campylographe. D'ailleurs les tracés sont obtenus avec rapidité ou avec lenteur; l'opérateur peut l'interrompre où il lui plaît pour étudier la courbe à loisir; il peut revenir en arrière aussi loin, aussi souvent qu'il est nécessaire, et rien ne limite le nombre de fois qu'une même courbe peut être tracée si l'on continue de faire marcher le mécanisme.

S'il s'en tenait à cela, comme l'appareil de M. Rohn présenté à la Société en 1891, le campylographe ne présenterait encore qu'un maigre intérêt. Mais les courbes de Lissajous, pour lui, ne sont en quelque sorte qu'au péristyle de l'immense galerie où vont se ranger en nombre illimité, avec une incroyable variété et par séries parallèles, les courbes simples ou compliquées, ouvertes ou fermées, provenant de la projection même de ces premières courbes, que j'appellerai élémentaires, sur un plan tournant dans des conditions diverses qui donnent lieu aux transformations des types les plus inattendues.

L'appareil rudimentaire, fait d'abord en carton puis en métal, dont je me suis servi pour obtenir déjà plusieurs centaines de courbes, m'a amené à créer, pour certaines conditions de son fonctionnement, cinq grandes familles ou séries de courbes, dans chacune desquelles les types peuvent être infinis et admettre eux-mêmes des variétés sans nombre. Cela suppose évidemment que l'appareil n'est pas limité dans les vitesses que ses pièces peuvent recevoir, supposition assurément inadmissible en pratique. Néanmoins, tel que je l'ai conçu et tel qu'il pourra aisément être construit par un de nos habiles artistes quand j'aurai pu réunir les fonds nécessaires, il permettra des vitesses composantes pour le tracé d'une même courbe qui seront encore dans le rapport de 1 à 50. On trouvera dans mon album des figures déjà assez compliquées, mais bien gracieuses, où ce rapport est de 1 à 15, et même de 1 à 20. Il est certain que les plus jolis effets sont le résultat des grandes vitesses combinées avec de très petites.

L'instrument définitif n'étant pas construit, on me pardonnera de ne pas entrer dans de grands détails sur les pièces qui le composent. Mais son principe et ses parties essentielles seront suffisamment indiqués dans l'étude mathématique suivante, à laquelle un de mes confrères a bien voulu soumettre le fonctionnement du campylographe. Je détache de cette étude, qui est loin d'être terminée, ce qui regarde les trois premières séries de courbes.

Première série. — *Courbes de Lissajous.* — Ces courbes sont tracées par le point P d'intersection de deux bielles rectangulaires, actionnées par deux systèmes de roues accouplées, ayant respectivement pour vitesses angulaires constantes des valeurs ω_0 et ω_1.

α est l'angle de $C'A'$ avec OX pour $t = 0$, moment où CA est couché sur OX; cet angle détermine la différence des phases initiales des deux mouvements vibratoires.

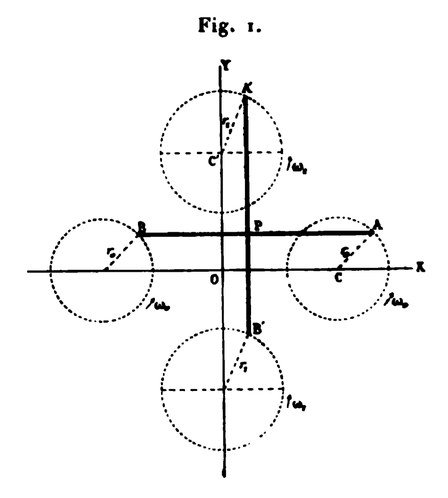
Équations.

$$X = r_1 \cos(\omega_1 t + \alpha),$$
$$Y = r_0 \sin(\omega_0 t).$$

Deuxième série. — *Projection des courbes de Lissajous sur un plan tournant concentrique.* — Le crayon placé au point P

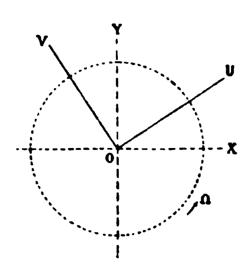
trace sa courbe non plus sur le plan fixe OXY, mais sur un

Fig. 1.



plan OUV tournant autour de O avec une vitesse angulaire constante Ω.

Fig. 2.



Équation de la courbe par rapport à deux axes rectangulaires OU, OV, *pris dans le plan mobile* (OU *coïncidant avec* OX *pour* $t=0$).

$$\begin{aligned} U = & \ \frac{r_1}{2}\left[\cos(\overline{\omega_1-\Omega}\,t+\alpha)+\cos(\overline{\omega_1+\Omega}\,t+\alpha)\right] \\ & + \frac{r_0}{2}\left[\cos(\omega_0-\Omega)t-\cos(\omega_0+\Omega)t\right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V = & \ \frac{r_1}{2}\left[\sin(\overline{\omega_1-\Omega}\,t+\alpha)-\sin(\overline{\omega_1+\Omega}\,t+\alpha)\right] \\ & + \frac{r_0}{2}\left[\sin(\omega_0-\Omega)t+\sin(\omega_0+\Omega)t\right], \end{aligned}$$

ou encore

$$U + Vi = \frac{r_1}{2}(e^{(bt+\alpha)i} + e^{-(at+\alpha)i}) + \frac{r_0}{2}(e^{b't.i} - e^{-a't.i}),$$

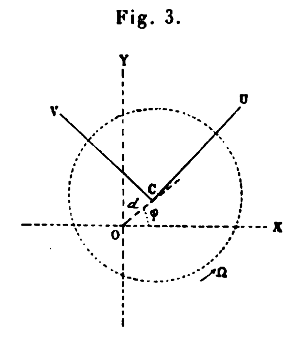
en posant

$$i = \sqrt{-1},$$
$$b = \omega_1 - \Omega,$$
$$a = \omega_1 + \Omega,$$
$$b' = \omega_0 - \Omega,$$
$$a' = \omega_0 + \Omega.$$

Troisième série. — *Projection des courbes de Lissajous sur un plan tournant excentrique.* — Soient

$OC = d$;
φ = angle de OC avec OX;
CU, CV deux axes rectangulaires pris dans le plan tournant : CU étant parallèle à OX pour $t = 0$.

Fig. 3.



Équation de la courbe.

$$U = \frac{r_1}{2}[\cos(bt+\alpha)+\cos(at+\alpha)] + \frac{r_0}{2}(\cos b't - \cos a't) - d\cos(\Omega t - \varphi),$$

$$V = \frac{r_1}{2}[\sin(bt+\alpha) - \sin(at+\alpha)] + \frac{r_0}{2}(\sin b't + \sin a't) + d\sin(\Omega t - \varphi).$$

ou encore

$$U + Vi = \frac{r_1}{2}(e^{(bt+\alpha)i} + e^{-(at+\alpha)i}) + \frac{r_0}{2}(e^{b't.i} - e^{-a't.i}) - de^{-(\Omega t - \varphi)i}.$$

Remarque. — Une équation de la forme

$$x = \cos(bt + \alpha),$$
$$y = \sin(bt + \alpha)$$

représente un mouvement circulaire. On remarque donc que la courbe tracée par le campylographe est aussi la résultante de plusieurs mouvements circulaires en nombre au plus égal à 5.

Le campylographe permet d'étudier graphiquement des courbes dont l'étude mathématique serait très difficile.

Il donne plusieurs résultats curieux sur les combinaisons de mouvements et pourrait être utile pour l'étude de mécanismes comportant des mouvements de rotation combinés.

L'étude des équations différentielles de ces courbes conduirait peut-être à quelques théorèmes nouveaux, intéressant soit l'Analyse, soit la Mécanique.

Les dessins gracieux et si féconds tracés par le campylographe pourraient être utilisés dans les arts décoratifs.

Les courbes des trois premières séries peuvent être photographiées en se servant d'un procédé analogue à celui de Lissajous : le rayon lumineux, deux fois réfléchi sur les diapasons croisés, serait dirigé sur une glace sensible tournant elle-même avec rapidité. La courbe qui se dessine à sa surface sera photographiée.

Banc d'optique pour l'étude de la vision;

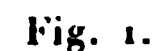
Par M. Albert Sandoz.

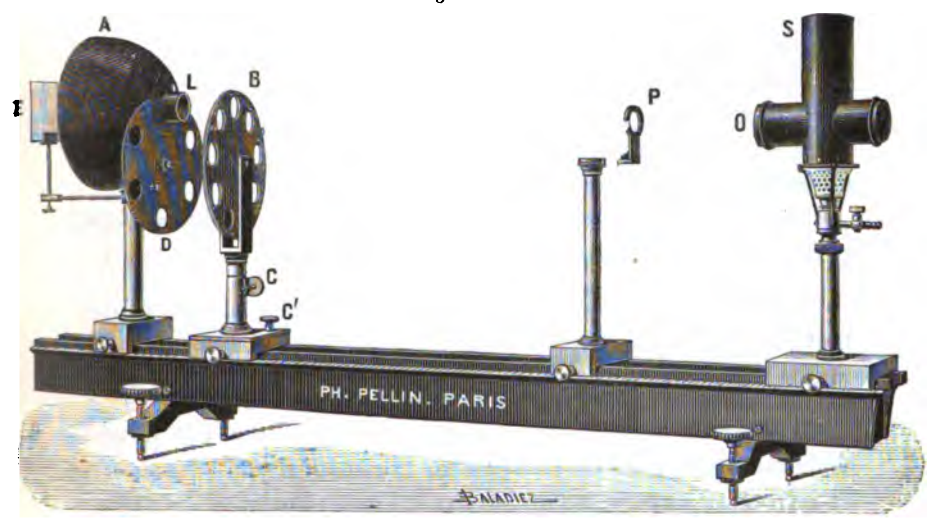
1. L'appareil, construit par M. Pellin, se compose d'un banc d'optique d'une longueur de $1^m,80$ sur lequel glissent des patins portant les pièces suivantes :

1° *Œil artificiel.* — Cet œil A est formé par une lentille convergente L (*cristallin*) de 5 dioptries, prise dans la boîte d'optique en usage dans les laboratoires de Physique médicale, et d'un diaphragme percé d'un trou pour simuler l'ouverture de la pupille.

2° *Écran rétine.* — En arrière de la lentille cristallin se trouve la rétine; c'est un écran en verre dépoli E, maintenu par un support à pince, qui peut glisser à frottement sur une tige carrée. Une vis de serrage le maintient fixe dans une position déterminée.

On peut ainsi réaliser *l'œil emmétrope, la myopie axile* ou *l'hypermétropie axile.*


Fig. 1.



Ces *amétropies* peuvent aussi s'obtenir en plaçant devant la lentille cristallin une *lentille convergente* ou *divergente :* on a ainsi *la myopie* ou *l'hypermétropie de courbure.*

Pour produire *l'œil astigmate,* il suffit d'accoler à la lentille cristallin, en L, une *lentille cylindrique.*

3° *Disque pour l'accommodation.* — L'accommodation s'obtient à l'aide des lentilles de la boîte d'optique, qui peuvent successivement venir se placer derrière la lentille cristallin et en augmenter graduellement la puissance.

Ces lentilles sont enchâssées dans un disque D, percé de six ouvertures, dans lesquelles elles pénètrent à frottement; elles y sont maintenues par un ressort. En faisant tourner ce disque, les lentilles se succèdent en augmentant de puissance. On peut à volonté remplacer les lentilles et avoir ainsi à sa disposition une nouvelle série.

La puissance d'accommodation est donnée *en dioptries* par la simple lecture du numéro du verre, inscrit sur sa monture.

4° *Disque optométrique.* — Sur un support B sont fixés deux disques pouvant tourner l'un vis-à-vis de l'autre. Ces disques portent chacun neuf ouvertures dans lesquelles se fixent à volonté les *lentilles positives* ou *négatives.*

C'est un moyen d'obtenir un grand nombre de combinaisons, soit en chargeant les deux disques de lentilles positives, soit l'un de lentilles positives et l'autre de lentilles négatives ou de lentilles cylindriques. Cet appareil est un véritable *optomètre,* il nous servira pour corriger les différentes *amétropies* que nous donnerons à l'œil artificiel.

Pour le centrage du disque B on dispose de crémaillères C, C' permettant un mouvement vertical ou latéral.

5° *Objet.* — Comme objet nous prenons une bonnette O portant une étoile, une fente ou un trou, éclairé par une lampe à gaz S munie d'un concentrateur.

6° *Support de verre correcteur.* — Un support P possède deux mouvements, l'un autour d'un axe vertical pour l'amener ou le retirer de l'axe optique du banc, l'autre autour d'un axe horizontal, donnant ainsi aux lentilles cylindriques l'orientation voulue pour corriger l'astigmatisme.

Ce support peut aussi recevoir les lentilles sphériques qui sont utilisées pour réaliser le microscope ou les autres instruments.

Sur la *fig.* 1, ce support P placé à 25^{cm} de l'objet O, porte une lentille convergente de 4 dioptries; il en résulte que les rayons sortent parallèlement et que l'objet semble être à l'infini.

2. Parmi toutes les expériences que ce banc d'optique permet de réaliser, nous nous bornerons à signaler ici celles qui se rapportent à la démonstration de la méthode très simple et très précise due au Dr Cuignet, de Lille, et appelée *méthode de l'ombre pupillaire.*

Voici comment on fait usage de cette méthode dans la pratique ophtalmologique. L'observateur se place à 1^{m} de la personne qu'il examine, et à l'aide d'un ophtalmoscope plan éclaire la pupille

observée, de façon qu'elle paraisse rouge et lumineuse dans toute son étendue; la personne doit regarder au-dessus de l'épaule de l'observateur, à la hauteur de son oreille et le plus loin possible.

L'œil observé et l'épaule de l'observateur doivent être tous deux droits ou tous deux gauches.

L'observateur, voyant la pupille parfaitement éclairée, donne à l'ophtalmoscope un petit mouvement de rotation autour de son manche. Il aperçoit alors la tache lumineuse se déplacer sur le visage de la personne observée en même temps qu'une ombre envahit la pupille.

Trois cas peuvent se présenter :

1° L'ombre qui envahit la pupille est *inverse;* elle marche en sens contraire de la tache lumineuse.

L'œil observé regarde à moins d'un mètre.

Il est myope de plus d'une dioptrie.

2° L'ombre envahit en *masse* la pupille.

L'œil observé regarde à la distance à laquelle se trouve l'observateur, c'est-à-dire à un mètre.

Il est myope d'une dioptrie.

3° L'ombre qui envahit la pupille est *directe;* elle marche dans le même sens que la tache lumineuse sur le visage.

L'œil observé regarde au delà d'un mètre.

Il est hypermétrope, emmétrope ou myope de moins d'une dioptrie.

Dans le premier cas, pour mesurer le degré de *myopie,* on fait passer devant l'œil observé des verres divergents de puissance croissante jusqu'à ce que l'œil n'ait plus qu'une dioptrie de myopie; ce que l'on reconnaît à l'envahissement en masse de la pupille, comme cela arrive immédiatement dans le deuxième cas.

Il suffit donc de forcer d'une dioptrie le verre employé pour avoir le numéro du verre correcteur.

Exemple. — L'envahissement de la pupille s'est produit pour un verre divergent de quatre dioptries, le verre correcteur est de cinq dioptries.

Dans le troisième cas, pour faire la distinction entre *l'hypermétropie, l'emmétropie,* ou la *myopie* de *moins d'une dioptrie,*

on place devant l'œil observé une lentille convergente d'une dioptrie.

1° Si l'ombre reste *directe,* l'œil observé est *hypermétrope.* On prend des verres convergents de puissance croissante jusqu'à l'envahissement en masse. A ce moment l'œil est rendu myope d'une dioptrie.

Il suffit de retrancher une dioptrie au verre employé, pour avoir le numéro du verre correcteur.

Exemple. — L'envahissement s'est produit pour un verre convergent de quatre dioptries, le verre correcteur est donc de trois dioptries.

2° Si l'ombre envahit en masse, l'œil observé est *emmétrope.*

3° Si l'ombre devient *inverse,* l'œil observé est *légèrement myope;* on place devant lui des verres convergents de moins d'une dioptrie, jusqu'à l'envahissement en masse de la pupille.

Il suffit donc de retrancher la puissance du verre employé de une dioptrie pour avoir le numéro du verre correcteur, qui sera divergent.

Exemple. — L'envahissement s'est produit pour un verre convergent de 0, 25 dioptrie, le verre correcteur est de 0, 75 divergent.

La méthode de l'ombre pupillaire peut aussi être employée pour déterminer *l'astigmatisme.*

Il faut chercher, comme il est dit plus haut, le verre donnant l'envahissement en masse dans le méridien horizontal. Si dans le méridien vertical l'ombre reparaît, c'est qu'il existe une différence de courbure entre les deux méridiens.

On cherche le verre correcteur de chaque méridien; *la différence entre les deux verres correcteurs donne la valeur de l'astigmatisme.*

Une explication très simple du phénomène de l'ombre pupillaire a été donnée par M. le Dr Weiss, dans le Tome II de la *Revue générale des Sciences,* 1891.

Elle peut être ainsi résumée :

Une zone éclairée de la rétine de l'œil observé donne un faisceau émergent, l'observateur voit la pupille éclairée ou sombre en ses divers points, suivant sa position dans le faisceau, et, si l'on

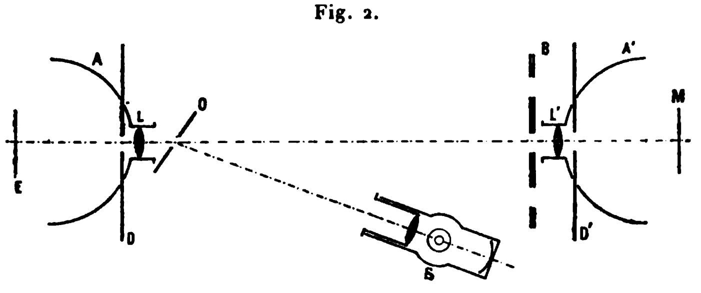
vient à déplacer la plage éclairée de la rétine observée, on verra des ombres envahir la pupille. Il est facile de voir que ce déplacement change de sens suivant que l'observateur est en deçà ou au delà du point d'intersection des divers cônes lumineux ayant pour base la pupille et pour sommet un point du plan sur lequel accommode l'œil observé.

Les ombres centrales qui se produisent ne font pas partie de l'ombre pupillaire, elles sont dues au trou de l'ophtalmoscope, ainsi qu'il est facile de le vérifier, en se servant comme ophtalmoscope d'un verre platiné sans trou, au lieu du miroir percé ordinairement employé.

3. Le dispositif que nous avons employé pour répéter ces expériences est représenté *fig.* 2.

En A′ se trouve l'œil observé dont l'écran rétine est remplacé par un petit miroir réfléchissant M pour avoir plus de lumière. A 1^{m} de l'œil observé, se place l'œil de l'observateur A et devant lui une sorte d'ophtalmoscope plan O, convenablement orienté pour faire tomber sur A′ les rayons lumineux de la lampe S, dont on a supprimé le diaphragme.

Fig. 2.



S Source lumineuse.
O Ophtalmoscope plan.
M Miroir réfléchissant faisant office de rétine de l'œil observé A′.
B Disque optométrique pour faire la mesure de l'amétropie.
A Œil observateur.

Les deux cristallins L, L′ des deux yeux A, A′ sont constitués par deux lentilles convergentes de cinq dioptries.

Pour juger du sens de l'envahissement de l'ombre pupillaire, on place une feuille de papier blanc autour de la pupille observée; on peut, dans une obscurité suffisante, voir sur la rétine de l'œil

observateur la tache produite sur ce papier par le faisceau éclairant. De la sorte, on sait si la tache pupillaire et cette zone éclairée sont envahies par l'ombre dans le même sens ou en sens inverse.

On règle la position de la rétine E de l'observateur pour avoir une image nette de l'ouverture de la pupille de l'œil observé A'.

Si donc on imprime un léger mouvement de rotation à l'ophtalmoscope et que l'*ombre pupillaire* et *la tache lumineuse marchent dans le même sens,* on sait que l'œil observé est *emmétrope, hypermétrope, ou myope de moins d'une dioptrie.*

Si l'ombre pupillaire et la tache se déplacent en sens inverse, l'œil observé est myope de plus d'une dioptrie.

Si l'ombre pupillaire envahit en masse, l'œil observé est myope d'une dioptrie.

SÉANCE DU 6 JUILLET 1894.

Présidence de M. Joubert.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 15 juin est lu et adopté.

M. le Président annonce à la Société la perte douloureuse qu'elle vient d'éprouver dans la personne de M. *Lemonnier,* qui fut membre du Conseil et l'un des bienfaiteurs de la Société. — M. Lemonnier a donné à la Société la dynamo si souvent utilisée pour l'éclairage et les projections.

M. le Président annonce que M. *Marey* fera au Collège de France, mercredi 11 juillet de 4^h à 5^h, une conférence sur les travaux en voie d'exécution à la Station physiologique; il indiquera aussi les ressources que cet établissement offre aux travailleurs; enfin il développera le programme des recherches, d'ordres très variés, qui peuvent y être exécutées.

Des démonstrations expérimentales auront lieu de 3^h à 4^h, les jeudis de juillet et d'août, à la Station physiologique (Parc des Princes).

M. Bouty fait une Communication *sur la capacité de l'électromètre capillaire.* — Il suppose que, les deux mercures de l'électromètre ayant été portés à une différence de potentiel e, on ramène le mercure par la pression au zéro du micromètre; qu'on sépare l'électromètre de la pile de charge, enfin qu'on lui fournit une quantité d'électricité dQ sans faire varier la pression.

La capacité de l'appareil, dans ces conditions, doit se composer, d'après la théorie de M. Lippmann, de deux termes, l'un relatif à la charge du petit mercure supposé immobile, l'autre à l'électricité produite ou absorbée par la variation d'étendue de la surface mouillée du petit mercure. Ce dernier terme, proportionnel au carré de la dérivée $\frac{dA}{de}$ de la tension superficielle par rapport à la force électromotrice, est largement prépondérant au voisinage de $e = 0$; le premier, proportionnel à $-\frac{d^2A}{de^2}$, subsiste seul au voisinage du maximum de A.

Pour mesurer la capacité $C = \frac{dQ}{de}$, M. Bouty mesure séparément les valeurs correspondantes de δQ et de δe dans les limites où la proportionnalité subsiste entre ces deux quantités. Il produit une quantité invariable d'électricité δQ à l'aide du quartz piézoélectrique de M. Curie, convenablement lesté, et il le décharge sur l'électromètre, dont la capacité peut être considérée comme infinie par rapport à celle du quartz. Il détermine ensuite, à l'aide d'une dérivation convenable prise sur la pile de charge, l'accroissement δe de force électromotrice nécessaire pour reproduire le même recul du mercure produit d'abord par δQ. Les résultats de ces mesures ont confirmé de tout point la formule déduite par M. Bouty de la théorie de M. Lippmann.

M. Bouty ajoute quelques mots sur la variation de la capacité de polarisation du mercure. Les mesures qu'il a eu l'occasion de faire à propos de la capacité de l'électromètre capillaire tranchent une question laissée douteuse par sa précédente Communication à la Société : elles prouvent que de $e = 0$ à $e = 0^{Da},4$ environ, la capacité $-\frac{d^2A}{de^2}$ décroît à peu près dans le rapport de 5 à 1 pour se maintenir ensuite très sensiblement constante au voisinage du maximum de A. M. Bouty attribue cette manière d'être à la présence d'un sel de mercure en quantité variable au contact du mercure et de l'eau acidulée. Les conditions simples prévues par la théorie de la couche double ne sont pas réalisées dans ces expériences.

Sur les propriétés des gaz très purs au voisinage du point critique; par M. P. Villard. — Depuis l'époque à laquelle Andrews a établi qu'au delà d'une certaine température la liquéfaction de l'acide carbonique cessait d'être possible, de nombreux travaux ont été faits, tant en France qu'à l'étranger, en vue de vérifier les conséquences de cette importante découverte. Jamin émit en 1883 l'idée qu'au delà du point critique la liquéfaction avait encore lieu, le liquide restant toutefois mélangé avec sa vapeur et possédant la même densité que celle-ci. MM. Cailletet et Colardeau ont réfuté cette manière de voir en montrant qu'à la température critique et au delà le liquide était plus dense que sa vapeur, dans laquelle il pouvait se dissoudre en toutes proportions. Dans ces deux dernières années, deux savants italiens, M. Zambiasi et M. Battelli, ont établi que pour l'éther

au moins l'égalisation des densités avait lieu au point critique, l'état liquide persistant du reste au delà.

L'auteur reprend quelques-unes des expériences indiquées par les précédents expérimentateurs, mais en s'attachant à opérer avec des gaz d'une très grande pureté; le protoxyde d'azote et l'acide carbonique, dont le point critique est mieux connu surtout depuis les travaux de M. Amagat et de M. Chappuis, ont été choisis pour cette étude.

Les gaz, traités d'abord par des absorbants convenables et amenés ainsi à ne contenir que des produits moins liquéfiables, sont distillés et bouillis, l'opération étant répétée deux fois et faite dans un appareil rigoureusement étanche.

Ainsi purifié le protoxyde d'azote est entièrement liquéfiable sous pression constante et l'acide carbonique traité par la potasse laisse un résidu inférieur à $\frac{1}{150000}$.

Ainsi rectifiés ces gaz sont enfermés soit dans un tube en O semblable à celui dont se servaient MM. Cailletet et Colardeau, soit dans un tube en U renversé, à courbure capillaire, analogue à l'appareil employé par M. Battelli pour l'éther.

Ces tubes sont ensuite portés à une température à peine supérieure à la température critique vraie : le tube en O permet alors de constater l'égalisation des densités; dans l'un et dans l'autre un refroidissement de quelques degrés amène dans les deux branches une condensation simultanée et identique.

L'auteur conclut de ces expériences qu'il ne paraît exister à la température critique qu'un fluide homogène et par suite qu'une seule densité. Un calcul simple montre que la présence d'un gaz étranger en quantité minime suffit à expliquer les résultats antérieurs.

L'expérience est faite devant la Société, avec l'acide carbonique, et permet de constater l'exactitude des faits annoncés.

Capacité de l'électromètre capillaire;

PAR M. E. BOUTY.

1. Je rappellerai que M. Lippmann (1) considère la polarisation du mercure au contact de l'eau acidulée comme un phénomène réversible caractérisé par les valeurs de deux variables indépendantes, la surface de contact S et la différence de potentiel e.

(1) LIPPMANN, Thèse de doctorat, 1875; *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. V, p. 494.

Soit dQ la quantité d'électricité à fournir à la surface pour produire les variations élémentaires dS et de. Posant

$$dQ = X\,dS + YS\,de, \tag{1}$$

et désignant par A la tension superficielle à la surface de contact, M. Lippmann démontre que l'on a

$$X = -\frac{dA}{de}, \tag{2}$$

$$Y = -\frac{d^2A}{de^2}. \tag{3}$$

Y est *la capacité électrique de polarisation par unité de surface à surface constante;* X est une quantité jouant un rôle analogue et qu'on peut nommer *la densité électrique par unité de surface créée à potentiel constant.*

2. J'ai eu fréquemment l'occasion d'employer l'électromètre capillaire au zéro comme une capacité pour la comparaison de petites quantités d'électricité. Je supposerai aujourd'hui, d'une manière plus générale, que, les deux mercures de l'électromètre ayant été portés à une différence de potentiel e, on ramène le mercure, par la pression, au zéro du micromètre; qu'on sépare l'électromètre de la pile de charge et qu'on lui fournit une quantité d'électricité dQ sans faire varier la pression. Quelle sera la variation de la différence de potentiel, ou, en d'autres termes, quelle sera, dans ces conditions, la capacité C de l'appareil?

La variation de la différence électrique, sur le grand mercure, étant négligeable, la totalité de la différence de potentiel de se porte sur le petit mercure. Soient S la portion de surface du petit mercure qui doit être considérée comme mouillée par l'eau acidulée, dS sa variation résultant du retrait dy de la colonne mercurielle. La capacité C de l'électromètre est, par définition, $\frac{dQ}{de}$, ou, d'après les formules (1), (2), (3),

$$C = \frac{dQ}{de} = -\frac{dA}{de}\frac{dS}{de} - S\frac{d^2A}{de^2}. \tag{4}$$

Je supposerai, pour fixer les idées, que l'on rend le petit mercure négatif. La variation de surface du ménisque étant négli-

geable, la variation de surface dS se réduit à la suppression de la surface latérale d'un cylindre ou plutôt d'un tronc de cône de rayon moyen r et de longueur dy,

$$-dS = 2\pi r\, dy.$$

On reconnaît sans peine que, pour une valeur donnée de e, dy est proportionnel à dA; le coefficient de proportionnalité dépend de l'angle au sommet du tronc de cône auquel peut être assimilé le tube dans la région voisine de zéro du micromètre. On a donc, en désignant par K une constante instrumentale,

$$dS = -K\, dA, \tag{5}$$

$$C = K\left(\frac{dA}{de}\right)^2 - S\frac{d^2A}{de^2}. \tag{6}$$

Telle est la valeur théorique de la capacité cherchée.

3. Pour juger de l'importance relative des deux termes dont se compose la capacité, j'ai fait construire, par M. Chabaud, des appareils de forme thermométrique dans les réservoirs desquels était soudé un fil de platine. Je substitue l'un de ces thermomètres au tube de l'électromètre capillaire et, puisque le petit mercure en contact avec l'eau acidulée se trouve ici immobilisé dans la tige du thermomètre, le second terme de la capacité subsiste seul.

Pour une valeur donnée de e, que je supposerai voisine de zéro. la capacité est alors proportionnelle à l'étendue S de la surface mouillée, que l'on peut, d'ailleurs, faire varier en déplaçant le ménisque par de petites variations de la température du réservoir du thermomètre. On constate que cette capacité est toujours petite par rapport à celle d'un électromètre dont le tube aurait la même section.

Ainsi, pour un thermomètre de $0^{mm},145$ de diamètre, la capacité a varié de $0^{mf},2$ à $0^{mf},8$ suivant la valeur de S. Mon électromètre, dont le tube a un diamètre de $0^{mm},0125$, c'est-à-dire environ douze fois plus faible que celui du thermomètre, a une capacité voisine de $0^{mf},6$.

4. Il suit de là que pour des valeurs de e voisines de zéro, la capacité de l'électromètre se réduit presque à son premier terme.

Elle décroîtra donc rapidement quand on fera croître e. On en jugera par le Tableau suivant. La première colonne donne e en daniells; la seconde les valeurs relatives de $\left(\frac{\delta A}{\delta e}\right)^2$; la troisième, les valeurs relatives de la capacité C. On a pris pour unités les valeurs correspondant à $e = 0$.

e.	$\left(\frac{\delta A}{\delta e}\right)^2$.	C.	δ.
da			
0,00	1	1	»
0,02	0,865	0,879	+ 0,014
0,04	0,705	0,782	+ 0,077
0,08	0,539	0,590	+ 0,051
0,12	0,430	0,503	+ 0,073
0,16	0,353	0,421	+ 0,068
0,2	0,256	0,309	+ 0,053
0,3	0,150	0,178	+ 0,028
0,4	0,090	0,129	+ 0,039
0,5	0,036	0,076	+ 0,040
0,6	0,024	0,061	+ 0,037

La différence δ des valeurs relatives de C et de $\left(\frac{\delta A}{\delta e}\right)^2$ est toujours positive. Elle correspond manifestement au terme en S de la formule (6). On voit que pour $0^{da},5$ les deux termes de la capacité deviennent sensiblement égaux et que, pour des valeurs supérieures de e, le terme en S devient prépondérant. Il doit subsister seul pour la valeur de e qui rend A maximum.

5. Voici maintenant les méthodes que j'ai employées pour la détermination expérimentale de C.

La plus pratique consiste à faire usage du quartz piézoélectrique de M. Curie. Cet appareil chargé de poids qui, dans mes expériences, ont varié de 200^{gr} à 3000^{gr} fournit des quantités d'électricité δQ rigoureusement proportionnelles aux poids tenseurs; et comme la capacité du quartz est négligeable par rapport à celle de l'électromètre, la totalité de δQ s'écoule sur ce dernier, dont elle élève le potentiel de δe. Elle se trouve de l'ordre de grandeur convenable pour que le mercure ne sorte pas du champ du microscope.

La manière d'opérer est la suivante : les électrodes du quartz

étant en dérivation sur l'électromètre, on porte le système au potentiel e à l'aide d'une pile de charge ([1]), et l'on ramène l'électromètre au zéro par l'emploi de la pression. Après avoir supprimé la pile de charge, on constate que la déperdition est pour ainsi dire nulle, tout au moins pour des valeurs de e inférieures à $0^{da},2$. C'est dans ces conditions qu'on leste le quartz, d'une manière assez brusque pour que l'électromètre atteigne sa nouvelle position d'équilibre en une seconde environ; on fait la lecture du micromètre, on déleste le quartz, on lit la position finale du mercure qui doit presque se confondre avec sa position initiale et l'on prend la moyenne δy des deux déplacements inverses du mercure. Enfin, on cherche, à l'aide de la pile de charge, quel est l'accroissement δe du potentiel qui produit le même déplacement δy.

Ces observations suffisent à déterminer les valeurs relatives de la capacité de l'électromètre. En effet, si, dans deux expériences successives, on leste également le quartz, δQ demeure le même. Le rapport des capacités de l'électromètre dans les deux expériences (désigné par C dans le Tableau ci-dessus) est donc le rapport inverse des δe correspondants. Nous savons, d'autre part, que les δy sont proportionnels aux δA; les valeurs relatives de $\frac{\delta A}{\delta e}$ et de $\frac{\delta y}{\delta e}$ sont donc égales, ce qui a permis de calculer les nombres de la deuxième colonne du Tableau.

6. On peut se passer du quartz piézoélectrique et fournir à l'électromètre des quantités connues d'électricité, à l'aide d'un condensateur que l'on charge à un potentiel $e + \Delta e$ et que l'on décharge sur l'électromètre au potentiel e. Soient C la capacité de l'électromètre, C_1 celle du condensateur, δe l'accroissement du potentiel mesuré, on a

$$(C + C_1)\,\delta e = C_1\,\Delta e,$$

$$C = C_1\,\frac{\Delta e - \delta e}{\delta e}.$$

Cette méthode donne la valeur absolue de la capacité C, mais elle est plus incommode et moins sûre que la précédente, parce

---

([1]) Dérivation convenable prise sur le circuit d'un élément Daniell.

que, les manipulations étant plus longues et l'équilibre plus lent à s'établir, l'influence de la déperdition est plus considérable. Je n'ai employé cette méthode que pour quelques vérifications.

Enfin, on peut combiner l'emploi du quartz piézoélectrique et du condensateur. On décharge le quartz piézoélectrique, d'abord sur l'électromètre seul, puis sur l'électromètre portant en dérivation le condensateur C_1. On a

$$\delta Q = C\,\delta e = (C + C)\,\delta' e,$$
$$C = C_1 \frac{\delta' e}{\delta e - \delta' e}.$$

C'est par cette méthode que je détermine, d'ordinaire, la capacité absolue de l'électromètre au voisinage de $e = 0$; elle est alors très précise. Mais les durées δt, $\delta' t$ nécessaires à l'établissement de l'équilibre, dans les deux phases de l'expérience, sont trop différentes pour qu'il n'en résulte pas une erreur systématique notable, si l'on applique cette méthode avec de grandes va leurs de e.

SÉANCE DU 20 JUILLET 1894.

Présidence de M. Joubert.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 6 juillet est lu et adopté.

Est élu Membre de la Société :

M. le Dr Tscherning, directeur adjoint du laboratoire d'Ophtalmologie à la Faculté des Sciences de Paris.

M. le Président annonce à la Société la mort de M. *Mallard*, membre de l'Institut. M. Mallard avait été Président de la Société en 1890, et il était l'un des membres les plus assidus aux séances; la perte d'un savant aussi éminent, d'un collègue aussi aimable, sera vivement ressentie par tous.

M. Tscherning présente à la Société un aberroscope formé par une lentille plan-convexe portant sur son côté plan un micromètre en quadrillage. En regardant à travers la lentille une flamme éloignée, les lignes du qua-

drillage paraissent déformées *en croissant* si l'œil a de l'aberration de sphéricité, *en barillet* si l'aberration est surcorrigée. Il montre ensuite un optomètre, que le physicien anglais Th. Young a fait construire au commencement de ce siècle, instrument tombé dans l'oubli depuis, mais qui a une grande importance pour l'Optique physiologique, parce que c'est le seul instrument qui permet de mesurer la réfraction *à différents endroits* de la pupille. Une description complète de l'instrument se trouve dans les *Œuvres ophtalmologiques* de Th. Young, édition annotée par M. Tscherning, qui en offre un exemplaire à la Société.

Des observations faites avec l'aberroscope prouvent que l'œil pendant l'accommodation surcorrige son aberration de sphéricité, fait incompatible avec la théorie de l'accommodation, due à von Helmholtz. L'optomètre de Young montre même que l'accommodation centrale dépasse l'accommodation périphérique de plus de la moitié. Ce phénomène tient à ce que la surface antérieure du cristallin, qui à l'état de repos est approximativement sphérique, prend pendant l'accommodation une forme hyperbolique : *la partie centrale augmente de courbure, les parties périphériques diminuent au contraire.* L'inconvénient optique qui en résulte est en grande partie éliminé par la contraction de la pupille qui accompagne l'accommodation. Des expériences faites avec des yeux d'animaux montrent qu'une traction exercée sur la zonule produit une déformation analogue du cristallin. Il devient donc probable que l'accommodation se fait par une traction, que le muscle ciliaire exerce sur la zonule, juste le contraire de la théorie de von Helmholtz, qui veut que l'accommodation se fasse par un relâchement de la zonule.

M. P. Villard expose à la Société les résultats qu'il a obtenus en colorant de l'acide carbonique par l'iode, comme l'avaient déjà fait MM. Cailletet et Colardeau.

Un tube Natterer, de volume légèrement supérieur au volume critique de son contenu, renferme l'acide coloré : si l'on agite, les colorations du liquide et de sa vapeur, très différentes à 0°, varient jusqu'à devenir identiques au-dessus de + 31°. En évitant au contraire l'agitation, la coloration même à + 35° reste localisée dans la partie inférieure du tube et tend seulement à se diffuser. Par refroidissement la condensation commence, dans ce dernier cas, par le bas de l'appareil.

Inversement, si par refroidissement à — 40° on dépose sur les parois l'iode peu soluble à cette température, on peut en retournant le tube laisser le dépôt en contact avec la vapeur seulement; dans ces conditions, si la température s'élève, la coloration de la vapeur dépasse bientôt celle du liquide sans qu'il soit nécessaire d'atteindre le point critique. En même temps une couche gazeuse parfaitement incolore se produit au-dessus du niveau, indiquant que la vaporisation n'entraîne pas l'iode resté dissous dans le liquide. Au delà de la température critique cette couche disparaît et la diffusion a lieu; par refroidissement la condensation commence cette

fois en haut du tube, ce qui montre que l'iode introduit des perturbations dans les phénomènes ordinaires.

Enfin un tube dans lequel il n'y a plus de liquide au delà de + 25° permet de constater que la vapeur carbonique n'a pas besoin d'être saturée pour se colorer par l'iode, ni à plus forte raison d'être mélangée avec du liquide.

L'examen spectroscopique ne montre dans aucun de ces deux tubes les cannelures caractéristiques de l'iode gazeux; le second ne contenant évidemment que du gaz au delà de + 25°, ce procédé ne peut permettre de décider si l'état liquide persiste au delà du point critique.

Ces expériences, complétant ainsi celles qui ont fait l'objet de la dernière communication, s'interprètent facilement suivant les idées d'Andrews, en tenant compte des perturbations introduites par l'iode et qui sont atténuées par l'agitation.

L'auteur termine en rappelant l'expérience par laquelle MM. Cailletet et Colardeau ont déterminé le point critique de l'eau et qu'ils ont répétée avec l'acide carbonique, en l'interprétant dans l'hypothèse d'une persistance de l'état liquide.

M. Pellat a donné des résultats obtenus une explication très simple, et l'auteur ajoute que la convergence assez exacte des courbes de tension obtenues au delà du point critique résulte de la forme même de l'isotherme critique, laquelle présente une partie horizontale pratiquement assez étendue, suivant laquelle elle est en même temps une ligne d'égale pression. Les droites représentatives de l'échauffement à volume constant coupent cette isotherme à la même hauteur même avec des volumes assez différents, et ce n'est qu'à des températures plus élevées que les pressions diffèrent. Cette méthode convient donc bien à la détermination du point critique vrai.

M. Pellat fait remarquer que, si la méthode de MM. Cailletet et Colardeau doit conduire à une valeur par excès de la température critique, les méthodes fondées sur la disparition du ménisque doivent en revanche fournir une valeur plus faible que la valeur réelle; les deux méthodes seraient donc très intéressantes à employer simultanément.

M. Villard insiste sur le fait, signalé par M. Gouy, que dans un tube en repos la position définitive du niveau n'est pas encore atteinte au bout de plusieurs semaines; l'état permanent n'étant pas établi, on ne peut être conduit à aucune conclusion précise; il est même possible de dépasser sensiblement la température critique sans voir disparaître totalement le niveau; l'agitation fait cesser ces anomalies et l'on se trouve alors dans des conditions définies auxquelles s'appliquent bien les remarques de M. Pellat.

L'auteur ajoute que, dans la mesure des densités du protoxyde d'azote et de sa vapeur saturée il n'a pu obtenir des résultats bien constants qu'en évitant ces phénomènes de retard, soit par l'agitation, soit au contraire

en séparant complètement le liquide de sa vapeur de manière à supprimer la vaporisation.

M. Amagat croit que les méthodes les plus simples sont celles qui donnent les meilleurs résultats; les procédés ordinaires, correctement appliqués, fournissent de bonnes déterminations des éléments critiques. En étudiant les isothermes au voisinage de ce point, en les représentant par une formule même peu rigoureuse comme celle de Van der Vals, on aura une excellente détermination par le calcul.

M. Wyrouboff fait remarquer que tous les résultats signalés par M. Villard s'interpréteraient parfaitement dans l'hypothèse où il existerait une combinaison dissociable d'iode et d'acide carbonique. Cette hypothèse n'est peut-être pas excessivement probable, mais elle n'est nullement absurde.

M. Villard répond que le fait du dépôt de l'iode par refroidissement semble plutôt indiquer qu'on est en présence d'une simple dissolution.

Sur les propriétés des gaz très purs au voisinage du point critique;

Par M. P. Villard.

Depuis les découvertes de Cagniard de Latour et d'Andrews, de nombreux travaux ont été effectués en vue de constater la généralité des phénomènes observés par ces deux physiciens, en vue surtout de vérifier les conséquences qui résultaient de leurs expériences.

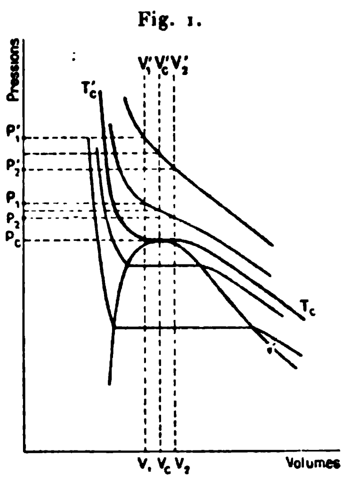
Ainsi qu'on devait s'y attendre, et en raison des difficultés que comportent les recherches de ce genre, les résultats obtenus ont conduit les expérimentateurs à des conclusions souvent opposées, et de nature à compliquer une question qui se présentait tout d'abord avec un caractère de grande simplicité.

L'examen d'un réseau d'isothermes analogue à celui construit par Andrews pour l'acide carbonique montre immédiatement que la liquéfaction d'un gaz, représentée graphiquement par la partie rectiligne des isothermes, est un phénomène de moins en moins accusé au fur et à mesure que la température s'élève.

On arrive bientôt à une isotherme limite $T_c T'_c$ qui n'offre plus

qu'un simple point d'inflexion à tangente horizontale. La température critique est atteinte, et à partir de ce moment les courbes ne présentent plus ni discontinuité rectiligne, ni tangente parallèle à l'axe des volumes, mais seulement une inflexion qui va s'atténuant de plus en plus. Il semble donc qu'au delà de la température critique ainsi définie il n'y ait plus de liquéfaction possible; on doit alors se trouver toujours en présence d'un fluide homogène ne possédant qu'une série unique de propriétés, et en particulier qu'une seule densité.

Fig. 1.



Dans les expériences qui font l'objet de cet exposé, j'ai précisément cherché à mettre en évidence cette homogénéité mise en doute par divers physiciens.

Ramsay (¹) en Angleterre et Jamin (²) en France ont émis l'idée qu'à la température critique la vaporisation n'était pas complète, les densités du liquide et de sa vapeur étant néanmoins égales. Les conclusions de Jamin peuvent se résumer ainsi :

A partir d'une certaine température, la densité du liquide devient et reste égale à celle de sa vapeur : c'est le point critique. La chaleur latente n'existe plus, le liquide se mélange avec sa vapeur dont rien ne le différencie, et il cesse alors d'être visible; mais la

(¹) *Proceedings of the Roy. Soc.*, t. XXX, p. 323, et t. XXXI, p. 194; 1880.
(²) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCVI, p. 1448; 1883 et t. XCVII, p. 10. *Journal de Physique*, 2ᵉ série, t. II, p. 393; 1883.

loi générale de vaporisation n'est interrompue à aucun moment par un point critique quelconque (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. XCVI; p. 1448).

Cette hypothèse a été combattue en 1889 par MM. Cailletet et Colardeau ([1]). Des expériences très ingénieuses les ont conduits à admettre qu'à la température de disparition du niveau et à plusieurs degrés au dessus il existait encore un liquide et une vapeur présentant des densités différentes, mais susceptibles de se dissoudre l'un dans l'autre en toutes proportions.

En 1892 et 1893 M. Zambiasi ([2]) et M. Battelli ([3]) sont arrivés au contraire à établir, en opérant avec l'éther, qu'au point critique il n'y avait qu'une seule densité, mais ils admettent que la vaporisation continue aux températures supérieures, conformément à l'hypothèse de Jamin.

La conclusion qui semble se dégager de ces divers travaux est qu'à la température critique et au delà il existe encore deux fluides distincts.

Sans vouloir faire une étude complète des phénomènes critiques, j'ai repris quelques-unes des expériences imaginées à ce sujet, mais en ayant soin d'employer des gaz aussi purs que possible; c'est là une condition dont l'importance se comprend immédiatement si l'on réfléchit que de l'acide carbonique, par exemple, contenant seulement un millième d'air en volume, est comparable comme pureté, une fois liquéfié, à de l'eau saturée d'air sous une pression de 18 atmosphères.

J'ai choisi pour ces recherches le protoxyde d'azote et l'acide carbonique dont le point critique est mieux connu, surtout depuis les travaux de M. Amagat ([4]) et de M. Chappuis ([5]).

([1]) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. CVIII; p. 1280. *Journal de Physique,* 2e série, t. VIII, p. 389; 1889. *Annales de Chimie et de Physique,* 6e série, t. XVIII; p. 269.

([2]) *Atti della Reale Accademia dei Lincei,* t. I, p. 423; 1892. *Journal de Physique,* 3e série, t. II.

([3]) *Annales de Chimie et de Physique,* 6e série, t. XXIX, p. 400; 1893.

([4]) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. CXIV, p. 1093. *Journal de Physique,* 3e série, t. I, p. 288; 1892.

([5]) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. CXVIII, p. 976; 1894.

J'indiquerai d'abord la manière d'obtenir ces gaz à un état de pureté convenable :

Protoxyde d'azote. — Je me suis servi, en le purifiant, du gaz que l'on trouve dans le commerce, liquéfié dans des récipients en fer. Destiné à des usages médicaux, il ne contient comme impuretés que de l'azote provenant de la préparation, un peu d'air et peut-être d'acide carbonique.

Au sortir du récipient, et après avoir franchi un robinet d'arrêt, le protoxyde traverse des tubes en cristal épais, de 10^{mm} à 12^{mm} de diamètre intérieur, contenant de la potasse, de la ponce sulfurique, de la potasse fondue, puis il se liquéfie dans un tube refroidi. La pression à laquelle a lieu la condensation s'élève peu à peu, indiquant nettement que l'azote et l'air s'accumulent dans l'atmosphère surmontant le liquide ; il convient de chasser de temps en temps ce mélange gazeux et même de faire bouillir le protoxyde liquéfié. Cette première distillation terminée, on élimine, par une ébullition prolongée, la majeure partie des gaz dissous, puis le tube est retourné et le liquide bouillant est dirigé, par la manœuvre d'un robinet, dans le tube définitif qui servira aux expériences ; les premières portions servent à laver les parois et sont rejetées, puis le remplissage a lieu, suivi d'une dernière ébullition assez longue, après quoi on procède à la fermeture.

Dans la plupart des cas, afin d'avoir des appareils indépendants et faciles à manier, j'ai scellé au chalumeau les tubes remplis de gaz liquéfié ; pour cela, un fragment de cire de masse négligeable (une fraction de milligramme) est placé d'avance à l'entrée d'une partie très capillaire, puis fondu au moment voulu. Cette obturation provisoire permet d'effectuer ensuite sans peine le scellage définitif. Mais la cire n'est pas nécessaire : si l'étranglement capillaire est assez fin, on peut couper le tube un peu au-dessus, et, pendant que le gaz s'échappe lentement, le cristal est fondu puis serré dans une pince froide et enfin recuit. Aucune trace d'air ne peut évidemment pénétrer et l'introduction d'une matière étrangère est évitée.

Toute cette rectification s'effectue dans un appareil absolument hermétique, sans joints par serrage, sans cuirs gras, les robinets eux-mêmes étant entièrement métalliques.

En une seule opération, j'ai pu obtenir ainsi jusqu'à 20^{gr} de protoxyde d'azote purifié.

Acide carbonique. — Le même procédé a été appliqué à l'acide carbonique livré par l'industrie. Il est seulement nécessaire de laisser sortir des récipients le gaz et non le liquide qui est souillé par diverses impuretés. L'acide en vapeur traverse d'abord un tube à acide chromique humide divisé par de la pierre ponce, et se liquéfie dans un grand tube refroidi contenant du bicarbonate de sodium; après y avoir subi une ébullition suffisante, le liquide obtenu est redistillé et se rend dans les appareils définitifs en passant sur de la ponce sulfurique. L'opération se termine comme pour le protoxyde d'azote.

La pureté des produits obtenus ainsi ne peut être que difficilement constatée par l'analyse, surtout en ce qui concerne le protoxyde d'azote. Pour l'acide carbonique, l'absorption par la potasse n'a laissé, sur 140^{cc} de gaz, qu'un résidu certainement inférieur à 1^{mmc}. Dans ces conditions, l'analyse n'a aucun sens précis, et elle n'a rien gagné à être répétée avec 600^{cc}.

Les propriétés physiques seules peuvent offrir un critérium suffisant.

Avec le protoxyde d'azote que j'avais étudié en premier lieu, j'ai constaté en particulier que la liquéfaction sans résidu se produisait dès que la pression dépassait de quelques centimètres de mercure la tension maxima. Le phénomène n'est pas rapide, il est vrai, mais si, au moment où il ne reste plus qu'une bulle gazeuse très petite, on promène celle-ci dans la masse parfois assez grande du liquide, on constate que sa disparition n'est pas sensiblement accélérée, comme cela aurait lieu si elle était formée par un gaz étranger dont la dissolution serait évidemment favorisée par l'agitation.

L'expérience se fait facilement dans un tube en U (*fig.* 2) contenant du mercure et une certaine quantité de protoxyde d'azote liquéfié réparti dans les deux branches. Les pressions en A et en B étant égales à la tension maxima du protoxyde liquide, le mercure tend à se mettre au même niveau de part et d'autre et ce résultat peut en effet s'obtenir; mais, si les choses sont disposées comme l'indique la figure, on voit que, même s'il n'y avait

plus de vapeur en A, la dénivellation *mm'* subsisterait encore. Sous l'influence de l'excès de pression qui en résulte pour la branche A, la liquéfaction totale y a lieu invariablement.

Fig. 2.

Inversement, si dans la branche B, dans laquelle le mercure est plus élevé, on condense par refroidissement toute la vapeur, le liquide, bien que soumis à une pression inférieure à sa tension maxima qui s'exerce alors en A, n'entre pas en ébullition, et le tube abandonné à lui-même reste indéfiniment dans le même état malgré les variations de la température ambiante.

En chauffant un peu le liquide dans la branche où il est condensé totalement, on le voit se dilater notablement sous pression constante sans bouillir.

Dans un tube relié à un manomètre, j'ai réussi à abaisser la pression de près de 10 atmosphères au-dessous de la tension maxima sans provoquer l'ébullition. Ce retard est surtout facile à obtenir avec l'acide carbonique, et, vers 0°, j'ai pu constater que la vaporisation, dans un tube ouvert avec précaution à l'air libre, se faisait uniquement par la surface; vers la fin de l'expérience seulement, le liquide résiduel s'est vaporisé brusquement en projetant dans tout le tube de la neige carbonique.

Ces expériences ne réussissent bien que dans des tubes parfaitement lavés, et s'ils doivent contenir du mercure ce dernier doit être bouilli dans le vide avant l'introduction du gaz liquéfié.

Avant d'aborder l'étude des phénomènes qui se produisent au

voisinage du point critique, il était nécessaire de connaître ce point, au moins approximativement, pour le protoxyde d'azote pur. Une limite supérieure de la température cherchée m'a été fournie par les densités du liquide et de sa vapeur saturée ([1]). Je rappellerai seulement que ces données ont été obtenues à 0° par des pesées directes faites sur plusieurs grammes de matière; au-dessus de 0°, j'ai mesuré les volumes occupés par une masse connue de liquide entièrement séparé de sa vapeur, mais soumis à la tension maxima de celle-ci. Enfin, les densités de vapeur se déduisaient de l'observation du niveau dans un tube de Natterer rempli à peu près au volume critique, porté à diverses températures et agité plusieurs fois avant toute mesure. Le tube était divisé et jaugé; une pesée faisait connaître le poids de protoxyde d'azote contenu. Une relation du premier degré donnait ensuite les densités de la vapeur en fonction de celles du liquide déjà déterminées.

Par ces dispositions j'ai pensé être à l'abri des phénomènes singuliers découverts par M. Gouy ([2]) et obtenir, aux erreurs de mesure près, la densité réelle du liquide et celle de la vapeur exactement saturée.

Les résultats obtenus m'ont conduit à admettre pour température critique approchée $+38°,8$. Cette valeur est sans doute trop élevée, mais, à la suite des travaux de M. Chappuis (*loc. cit.*), j'ai abandonné cette détermination qui me paraît pouvoir être plus rigoureusement faite par l'étude des indices qu'autrement.

Je me suis alors borné à établir qu'au-dessus de la température critique, par suite à $+38°,8$, le protoxyde d'azote se présentait comme un fluide parfaitement homogène. J'ai rempli à peu près au volume critique deux tubes en O contenant l'un du mercure, l'autre de l'acide sulfurique, et semblables à celui employé par MM. Cailletet et Colardeau (*loc. cit.*), mais scellés et indépendants. Le protoxyde liquide ayant été réuni d'abord dans l'une des branches où il formait une colonne de 25^{cm}, l'appareil a été porté à $+38°,8$. A cette température, les densités se sont montrées par-

([1]) *Comptes rendus des seances de l'Académie des Sciences*, t. CXVIII, p. 1096; 1894.

([2]) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXVI, p. 1289; 1893.

faitement égales, le mercure ou l'acide sulfurique ne présentant plus aucune différence de niveau. Par un refroidissement uniforme, la condensation s'est produite avec une simultanéité parfaite dans les deux branches, débutant par un nuage bleu dont la lumière était entièrement polarisée, et auquel succédait brusquement une véritable émulsion blanche formée de gouttelettes liquides; l'expérience terminée, des quantités rigoureusement égales de liquide se présentaient dans les deux branches.

Un tube en U renversé, à courbure capillaire, analogue à celui dont se servait M. Battelli (*loc. cit.*), a donné la même identité de condensation après avoir été porté à $+ 38^{\circ},8$.

Il m'a paru indispensable de répéter les mêmes expériences avec l'acide carbonique dont le point critique vrai a été très exactement déterminé par M. Amagat au moyen des isothermes et par M. Chappuis en se servant de l'indice de réfraction; les deux nombres obtenus étant très voisins, il semblait d'autant plus intéressant de vérifier l'égalité des densités à la température pour laquelle l'égalisation des indices et la disparition de la partie rectiligne des isothermes ont lieu en même temps.

Avec le tube en O, aussi bien qu'avec l'appareil de M. Battelli, j'ai obtenu les mêmes résultats que précédemment, et à la température de $31^{\circ},7$, c'est-à-dire très peu au-dessus du point critique fixé à $31^{\circ},4$ par M. Chappuis.

Il est facile de se rendre compte de la nécessité qu'il y a à employer dans ces expériences des gaz très purs.

Supposons, par exemple, que l'acide carbonique employé contienne à la pression ordinaire $\frac{1}{1000}$ d'air en volume; ramené par la compression dans le tube en O à un volume environ 500 fois plus faible, le volume critique, ce mélange contiendra de l'air à une pression voisine d'une demi-atmosphère, en le supposant également réparti dans l'appareil.

Par élévation de température, le liquide va entrer en ébullition, et l'air se réunira par distillation dans la branche qui ne contient que de la vapeur : sa pression y atteindra près d'une atmosphère. Au point critique, les densités en seront peu affectées, il est vrai, mais par refroidissement la condensation ne sera pas simultanée dans les deux branches, la vapeur n'étant pas saturée, dans celle

qui renferme l'air, à la même température que dans l'autre et la différence des tensions étant voisine d'une atmosphère.

Or, on peut considérer que de l'acide carbonique ne renfermant que $\frac{1}{1000}$ d'air est beaucoup plus pur que celui qui a été employé dans la plupart des cas, même par Andrews. Ce titre de $\frac{999}{1000}$ n'a été dépassé que dans des expériences récentes. Quant au protoxyde d'azote, il renferme fréquemment 5 à 10 pour 100 d'azote, dont il est impossible de le débarrasser par les moyens ordinaires.

Il n'est donc pas surprenant que les résultats que j'ai obtenus n'aient pas pu être constatés antérieurement.

On peut remarquer en passant que MM. Cailletet et Colardeau admettaient comme température critique la température de disparition du niveau dans un tube observé à l'œil nu. Ce phénomène paraît avoir lieu au-dessous du point critique vrai, comme l'a montré M. Pellat ([1]), et la différence serait de quelques dixièmes de degré avec l'acide carbonique que j'ai préparé. On peut dès lors dire que l'état liquide persiste dans cet intervalle de température qui sera peut-être réduit par de nouvelles expériences.

J'ai tenu seulement à établir que l'égalisation réelle des densités avait bien lieu au delà du point critique vrai, ainsi que cela résulte de la théorie d'Andrews. Ce fait n'avait pas été vérifié directement avec les gaz.

Relativement à l'acide carbonique, j'ai cru devoir compléter ces expériences en étudiant les propriétés que peut mettre en évidence la coloration produite par l'iode et employée dans le même but par MM. Cailletet et Colardeau.

J'ai préparé un tube Natterer rempli d'acide carbonique renfermant une trace d'iode, et dont le volume était légèrement supérieur au volume critique afin de n'avoir que de la vapeur au point critique.

En agitant le tube pour favoriser la vaporisation ou la condensation, on observe qu'à la température ordinaire le liquide est fortement coloré, la vapeur très peu. Les deux colorations se rapprochent l'une de l'autre quand la température s'élève, et quand on dépasse + 31° elles paraissent absolument identiques,

---

([1]) *Journal de Physique*, 3e série, t. I, p. 225; 1892.

montrant ainsi que le liquide et sa vapeur, bien que séparés encore par un niveau, ont des propriétés à peine différentes et tendent vers un état unique.

Si le tube n'est pas agité, la coloration reste localisée à la partie inférieure, même à + 35°; elle tend seulement à se diffuser lentement. Par refroidissement, la condensation commence dans le bas du tube, contrairement à ce qui se passe dans l'expérience précédente ou dans un tube ne contenant pas d'iode, le phénomène se produisant alors partout à la fois.

Pour expliquer ce résultat, j'ai fait déposer sur les parois, par refroidissement à — 40°, l'iode peu soluble à cette température : en retournant le tube, le dépôt était en contact avec la vapeur seule, le liquide restant faiblement teinté. Dans ces conditions, j'ai élevé la température sans agiter. La vapeur carbonique dissolvant l'iode n'a pas tardé à être plus colorée que le liquide; en même temps, la vapeur qui se dégageait de ce dernier était absolument incolore et formait au-dessus du niveau une couche bien nette qui allait en se diffusant dans le fluide de plus en plus coloré qui la surmontait. Au-dessus de la température critique, cette zone incolore n'existait plus, ce qui semble indiquer qu'il n'y a plus alors de vaporisation. Par refroidissement, la condensation commençait dans le haut du tube, c'est-à-dire dans la partie la plus chargée d'iode. On comprend alors pourquoi, dans l'expérience précédente, la coloration restait localisée dans la partie occupée primitivement par le liquide : ce dernier en effet n'entraînait pas l'iode en se vaporisant. En même temps, la condensation n'étant pas homogène, on pouvait supposer qu'il existait encore du liquide à + 35°; la dernière expérience montre que c'est là une perturbation due à l'inégale répartition du corps dissous.

L'examen spectroscopique ne m'ayant montré, dans aucun cas, les cannelures caractéristiques du spectre de l'iode en vapeur, j'ai jugé nécessaire de faire une expérience à ce sujet avec un tube dans lequel il n'y avait plus de liquide à + 25°. J'étais ainsi en présence d'acide carbonique certainement gazeux à partir de cette température. J'ai donné au tube un diamètre intérieur de 8^{mm} pour compenser le peu d'intensité de la coloration. En même temps, j'observais par comparaison un tube semblable renfermant de l'air à la pression ordinaire et un peu d'iode : en

chauffant un peu ce dernier, j'obtenais une teinte en apparence identique à celle que présentait le tube à acide carbonique; elle suffisait largement pour voir le spectre sillonné de cannelures bien nettes, tandis que rien de semblable ne se manifestait avec l'acide carbonique coloré, aussi bien à + 40° qu'à + 25°. Il faut donc admettre que l'iode dissous ainsi dans un gaz comprimé n'est pas simplement mélangé à l'état gazeux, et l'on comprend alors pourquoi le tube à acide carbonique présente, à égalité de température, une coloration beaucoup plus intense que celle du tube de comparaison. On voit également que l'absence des cannelures caractéristiques dans le spectre ne permet pas de conclure à la persistance de l'état liquide au delà du point critique.

Il n'y a par conséquent rien, dans ces expériences, qui soit en contradiction avec les idées d'Andrews, c'est-à-dire qui puisse infirmer l'existence, au-dessus du point critique, d'un fluide unique et parfaitement homogène.

J'ajouterai, pour terminer cette étude, que l'examen des courbes d'Andrews fournit une explication simple des résultats obtenus par MM. Cailletet et Colardeau dans leurs expériences sur le point critique de l'eau ([1]), expériences qu'ils avaient réalisées antérieurement avec l'acide carbonique (*loc. cit.*). A l'interprétation très simple donnée par M. Pellat ([2]) je crois pouvoir ajouter une simple remarque.

Si, dans le diagramme donné au début de cet exposé, on considère plusieurs lignes d'échauffement à volume constant, telles que $V_1V'_1$, $V_2V'_2$, ces lignes, sans avoir besoin d'être très voisines de l'ordonnée $V_cV'_c$ qui correspond au volume critique, rencontreront l'isotherme critique sensiblement à la même hauteur, par suite à la même pression P_c, et cela en raison de l'inflexion assez allongée de l'isotherme. Au point critique, la pression sera donc sensiblement la même pour plusieurs volumes différents, ou encore pour plusieurs masses occupant le même volume. Il n'en sera évidemment plus de même aux températures plus élevées, comme le montre la *fig.* 1.

([1]) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXII, p. 563 et 1170. *Journal de Physique*, 2ᵉ série, t. X, p. 333; 1891. *Annales de Chimie et de Physique*, 6ᵉ série, t. XXV, p. 519; 1892.

([2]) *Journal de Physique*, 3ᵉ série, t. I, p. 225; 1892.

Les courbes de tension maxima resteront donc confondues jusqu'à l'isotherme critique, au moins pratiquement, et ne se sépareront qu'au delà, à une température d'autant plus élevée que le manomètre employé sera moins sensible. Elles formeront alors le faisceau divergent partant assez exactement d'un point unique, et si nettement obtenu par les expérimentateurs qui ont imaginé cette ingénieuse méthode.

SÉANCE DU 2 NOVEMBRE 1894.

PRÉSIDENCE DE M. JOUBERT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 20 juillet est lu et adopté.

M. le PRÉSIDENT annonce les pertes regrettables que la Société a faites pendant les vacances dans les personnes de MM. *Archambault*, ancien Professeur au Lycée Charlemagne, *Deleuil*, constructeur, et *Chervet*, Professeur au Lycée Saint-Louis.

M. le PRÉSIDENT annonce l'organisation d'une École d'application dans le Laboratoire central d'Électricité, 12 et 14, rue de Staël. L'ouverture des Cours pour l'exercice 1894-1895 aura lieu le lundi 3 décembre.

Recherches sur la condensation des gaz de l'électrolyse par les métaux de la famille du platine. Application à la pile à gaz; par MM. CAILLETET et COLARDEAU. — On sait que, dans l'électrolyse de l'eau par des électrodes de platine, les gaz hydrogène et oxygène, séparés par l'action du courant, n'apparaissent pas immédiatement après l'établissement de ce courant. De plus, après la rupture du circuit, une différence de potentiel persiste entre les deux électrodes, de sorte qu'en fermant sur lui-même le voltamètre par un fil conducteur, il se produit un courant inverse de celui qui traversait d'abord le liquide.

On explique ces effets par la recombinaison des gaz hydrogène et oxygène condensés par le platine. La durée du courant de décharge ainsi obtenu est très faible.

En remplaçant, dans cette expérience, le platine en lames ou en fils par le platine en mousse, susceptible, par sa grande porosité, d'emmagasiner beaucoup de gaz, il y avait lieu d'espérer qu'on obtiendrait de meilleurs résultats au point de vue de l'intensité et de la durée du courant de décharge, sans rencontrer les inconvénients inhérents à la pile à gaz

de Grove, qui ne donne qu'un débit extrêmement faible à cause de sa grande résistance intérieure et de la lenteur de la recombinaison des gaz libres par le platine métallique.

En prenant comme électrodes d'un voltamètre deux masses de mousse de platine (6^{gr} environ) enfermées dans deux sacs d'étoffe de soie et reliées par deux fils de même métal aux deux pôles d'une pile, on a obtenu, en effet, un courant de décharge suffisant pour actionner une sonnerie électrique pendant plusieurs minutes.

Étant donnée l'influence bien connue de la pression sur la condensation des gaz par la mousse de platine, il y avait chance d'obtenir des résultats encore meilleurs en enfermant l'appareil dans un récipient résistant et en exerçant sur lui une forte pression. En opérant ainsi, on a obtenu, en effet, un courant de décharge suffisant pour actionner la même sonnerie pendant des heures entières. L'appareil est devenu un véritable accumulateur d'énergie électrique susceptible de se prêter à des mesures de capacité, de force électromotrice et de débit.

On a obtenu les résultats suivants :

Sous la pression de 1^{atm}, la force électromotrice de l'appareil chargé s'élève à $1^{volt},8$ environ au début de la décharge. Elle baisse d'une manière uniforme, et sans arrêt, jusqu'à zéro.

Quand on augmente la pression, l'allure de la décharge se modifie profondément et comprend trois périodes.

1° Une période de chute très rapide de l'intensité du courant de décharge.

2° Une période d'intensité constante. Elle occupe la majeure partie de la durée totale de la décharge. Pendant cette période, la force électromotrice de l'appareil se maintient voisine de 1^{volt}. L'intensité du courant de décharge augmente un peu avec la pression.

3° Une nouvelle période de chute moins rapide que la première.

Si l'on évalue la capacité de l'accumulateur ainsi formé, en la rapportant à 1^{kg} de mousse de platine employée comme électrodes, on trouve qu'elle est de 56 ampères-heure pour une pression de 580^{atm}. (On sait que la capacité pratique des accumulateurs industriels au plomb varie de 10 à 20 ampères-heure par kilogramme de métal.)

Quant à l'intensité du courant de décharge, elle peut atteindre facilement 100 ampères par kilogramme de platine.

Pour tirer le meilleur résultat possible d'une masse donnée de mousse de platine, il ne faut pas la répartir en quantités égales aux deux électrodes. L'expérience a montré qu'on obtient la capacité maxima en prenant pour l'électrode négative une quantité de mousse trois fois plus grande qu'au pôle positif.

Des mesures sur le rendement, en quantité, de l'appareil, ont donné des valeurs élevées (95 à 98 pour 100) quand on ne pousse pas la charge à ses dernières limites et que la décharge succède immédiatement à la charge. Quand ces conditions ne sont pas respectées, le rendement diminue.

Plusieurs autres métaux de la famille du platine, préparés à l'état de mousse par M. Joly, ont été soumis aux mêmes expériences.

Avec l'iridium, on a obtenu des résultats analogues à ceux donnés par le platine.

Avec le ruthénium, il y a attaque du métal par le liquide acide au pôle positif. Néanmoins, il y a encore accumulation de gaz dans la mousse métallique et la durée de la décharge augmente encore beaucoup avec la pression. Mais l'allure de cette décharge est modifiée. La force électromotrice baisse sans temps d'arrêt jusqu'à zéro aussi bien sous la pression de 100^{atm} qu'à la pression de 1^{atm}.

C'est avec le palladium que les résultats les plus intéressants ont été obtenus. Dès la pression ordinaire, la décharge présente l'allure de celle que donne le platine à partir de 20^{atm} à 30^{atm}, c'est-à-dire que la force électromotrice, après être tombée rapidement de $1^{volt},8$ vers 1^{volt}, se maintient pendant un certain temps à cette dernière valeur pour tomber à nouveau, mais plus lentement, jusqu'à zéro. Sous pression, ces effets s'exagèrent, comme pour le platine, mais l'accumulateur possède une capacité bien plus grande qu'avec ce métal. A la pression de 600^{atm}, les mesures ont donné une capacité de 176 ampères-heure par kilogramme de mousse de palladium.

Les propriétés observées sur la mousse de platine s'étant généralisées à plusieurs des métaux qui l'accompagnent dans ses minerais, on a soumis aux mêmes essais des métaux d'autres familles.

L'or précipité du chlorure par le gaz sulfureux a été trouvé apte à former aussi un accumulateur de capacité variable avec la pression. Cette capacité est d'ailleurs plus faible que celle obtenue avec le palladium ou le platine. L'allure de la décharge est également un peu différente de celle que donnent ces métaux.

Avec l'argent, le nickel, l'étain et le cobalt, il y a altération chimique des métaux par le liquide ou par les produits de l'électrolyse. On a bien accumulation d'une certaine quantité d'énergie électrique, mais elle n'augmente pas avec la pression et paraît due à une altération d'ordre chimique, comme celle à laquelle les accumulateurs au plomb doivent leurs propriétés. Il en est de même avec des corps non métalliques comme le charbon.

En résumé, parmi les diverses substances essayées, les métaux nobles non susceptibles de s'altérer chimiquement au contact de l'électrolyte ou des produits de sa décomposition semblent seuls aptes à former des accumulateurs à gaz condensés dont la capacité augmente avec la pression. Pour quelques-uns de ces métaux, la capacité peut atteindre des valeurs élevées et notablement supérieures à celles que donnent, dans la pratique courante, les accumulateurs au plomb.

M. Le Chatelier fait remarquer l'intérêt que présente la détermination faite par MM. Cailletet et Colardeau de la force électromotrice de la pile

à gaz; on peut, en effet, d'après la formule de Helmholtz, déduire de là la connaissance de la dissociation de l'eau.

Expérience de démonstration des courants thermo-électriques; par M. Ch.-Ed. Guillaume. — L'expérience classique par laquelle on démontre l'existence des courants thermo-électriques est plus frappante lorsqu'on retourne l'appareil, comme M. d'Arsonval et M. Boys l'ont déjà fait dans leur radiomètre thermo-électrique. M. Guillaume a réalisé, d'après ce principe, un appareil de construction très simple, consistant en une roue de $0^m,15$ de diamètre environ, dont la jante est constituée par un fil fin d'un alliage nickel-cuivre, et dont les diamètres sont des fils fins de cuivre. soudés à la jante à la soudure forte. Une chappe en métal, fixée au milieu d'un diamètre, permet de poser l'appareil en équilibre sur une aiguille. Un aimant en fer à cheval est placé de manière à embrasser un demi-diamètre de la roue. Si l'on chauffe l'autre extrémité de ce diamètre, la roue se met à tourner par un mécanisme évident.

M. Guillaume expose ensuite une *Théorie de la conservation de l'atmosphère des astres,* qu'il avait développée avant d'avoir connaissance d'un travail similaire de plusieurs physiciens anglais, et notamment de Sir Robert Ball sur le même sujet. Cette théorie n'est donc plus nouvelle, mais M. Guillaume estime qu'elle peut encore conduire à des résultats intéressants.

Si, dans la théorie cinétique des gaz, on envisage les molécules situées à la limite d'une atmosphère, on sera conduit à les considérer comme absolument libres de se mouvoir dans tous les sens, et susceptibles de quitter définitivement le corps céleste auprès duquel elles se trouvent, si leur vitesse est suffisante. Cette vitesse est de 11^{km} par seconde pour les limites de l'atmosphère terrestre, de $2^{km},4$ pour la Lune, de 614^{km} pour le Soleil, etc. D'un autre côté, la vitesse moyenne d'une molécule à la température de la glace fondante est de 1843^m, 492^m et 461^m par seconde pour l'hydrogène, l'azote et l'oxygène, et il se trouve constamment près de $\frac{1}{10000}$ de la totalité des molécules dont la vitesse dépasse le triple de ces valeurs. Les vitesses varient, du reste, proportionnellement à la racine carrée des températures absolues. A 1000°, par exemple, une fraction importante des molécules d'hydrogène se trouvent dans des conditions favorables pour quitter la Terre, tandis que, même à 5000°, l'azote et l'oxygène ne peuvent l'abandonner que dans une proportion négligeable. Il n'en est pas de même pour la Lune, sur laquelle ces gaz n'ont pu se maintenir même à une température inférieure à 1000°; sur le Soleil, au contraire, l'hydrogène lui-même doit se conserver indéfiniment, aux températures inférieures à 10000° que l'on attribue aujourd'hui à notre astre central. Si la théorie est exacte, on peut même fixer une limite supérieure de température que le Soleil n'aurait pas pu dépasser sans perdre de grandes quantités d'hydrogène. Par exemple, il est inadmissible que le Soleil ait jamais atteint une température de 1000000°.

M. WYROUBOFF a trouvé récemment un nouveau corps dont les cristaux sont doués du pouvoir rotatoire : c'est le silicotungstate potassique décrit jadis par Marignac et qui a pour formule $12TuO^3 SiO^2$, $2K^2O$, 18Aq. Le phénomène de la déviation du plan de polarisation y est d'une netteté parfaite, comme dans les plus beaux échantillons de quartz; on n'y aperçoit aucune anomalie optique et la croix noire ne s'y disloque aucunement. Les cristaux appartiennent à la symétrie hexagonale et sont composés d'un prisme et d'une pyramide assez obtuse. Ils sont malheureusement rarement très limpides et s'effleurissent avec une très grande facilité.

La double réfraction y est négative et tous les cristaux sans exception sont *dextrogyres*. La déviation par 1^{mm} d'épaisseur et par la raie D est de $+ 14°,2$, par conséquent un peu plus de la moitié de celle qu'on observe dans le quartz.

Dans un travail récent, M. Wyrouboff a montré que tous les corps qui n'ont pas d'inverse optique et qui sont toujours lévogyres ou toujours dextrogyres ne possédaient pas de facettes hémiédriques. Le silicotungstate potassique en est un nouvel exemple : il n'est que dextrogyre et n'est pas hémièdre.

M. LIPPMANN communique une Note de MM. AUGUSTE et LOUIS LUMIÈRE sur un *nouveau procédé d'argenture des glaces à froid*, d'un emploi très simple et très économique, tout l'argent du bain étant utilisé; le bain d'argent ammoniacal qui ne doit pas renfermer d'excès d'ammoniaque est réduit par une dissolution à 1 pour 100 de formaldéhyde; le mélange des deux solutions doit être versé sur la glace de telle façon qu'il la recouvre d'un seul coup; au bout de 5 minutes, le dépôt est effectué et on lave à grande eau.

Recherche sur la condensation des gaz de l'électrolyse par les corps poreux et en particulier par les métaux de la famille du platine. Application à la pile à gaz. Accumulateurs électriques sous pression;

PAR MM. L. CAILLETET ET E. COLARDEAU.

On sait que, dans l'électrolyse de l'eau par des électrodes de platine, les gaz hydrogène et oxygène séparés par l'action du courant n'apparaissent pas immédiatement après l'établissement de ce courant. De plus, après la rupture du circuit, une différence de potentiel persiste entre les deux électrodes, de sorte que, en fermant sur lui-même le voltamètre par un fil conducteur, il se produit un courant inverse de celui qui traversait d'abord le liquide.

On explique ces effets par la recombinaison des gaz hydrogène et oxygène condensés par le platine. La durée du courant ainsi obtenu est très faible.

Nous avons pensé qu'en prenant comme électrodes des substances capables d'emmagasiner beaucoup de gaz, nous aurions des chances d'obtenir de meilleurs effets au point de vue de la durée et de l'intensité du courant de décharge, sans rencontrer les inconvénients inhérents à la pile à gaz de Grove, qui ne donne qu'un débit extrêmement faible à cause de sa grande résistance intérieure et de la lenteur de la recombinaison des gaz libres par le platine métallique.

Nous avons essayé d'abord la mousse de platine. Nous avons enfermé une certaine quantité de cette matière (6gr environ) dans deux petits sacs d'étoffe de soie dans chacun desquels pénétrait un fil de platine destiné à amener le courant. Ces sacs, placés dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$ et reliés aux deux pôles d'une pile, ont été saturés de gaz par le passage du courant et ont fourni une décharge beaucoup plus intense et beaucoup plus prolongée que celle que l'on aurait obtenue avec le même poids de platine à l'état métallique ordinaire et non spongieux.

L'appareil fonctionnant, dans ces conditions, comme une véritable pile à gaz condensés, nous avons pensé qu'une forte pression augmenterait le pouvoir absorbant du platine en mousse. Pour le vérifier, nous avons enfermé l'appareil dans un réservoir en acier, et nous avons exercé sur lui, à l'aide d'une pompe hydraulique, des pressions que nous avons poussées jusqu'à 600 atmosphères. Ainsi que nous l'avions pensé, la durée du courant de décharge a augmenté beaucoup avec la pression. L'appareil est devenu un accumulateur d'énergie électrique pouvant se prêter à des mesures de capacité, de force électromotrice et de débit.

Les courbes ci-jointes (n° 1) représentent les résultats obtenus avec un appareil contenant 6gr de mousse de platine et intercalé sur un circuit de décharge d'une résistance de 2 ohms. Sur l'axe vertical sont portées les intensités du courant de décharge et, sur l'axe horizontal, les temps. On voit que, sous la pression atmosphérique, la durée de la décharge n'est que de dix secondes environ. La force électromotrice initiale, égale à 1volt,8, baisse sans discontinuité jusqu'à zéro.

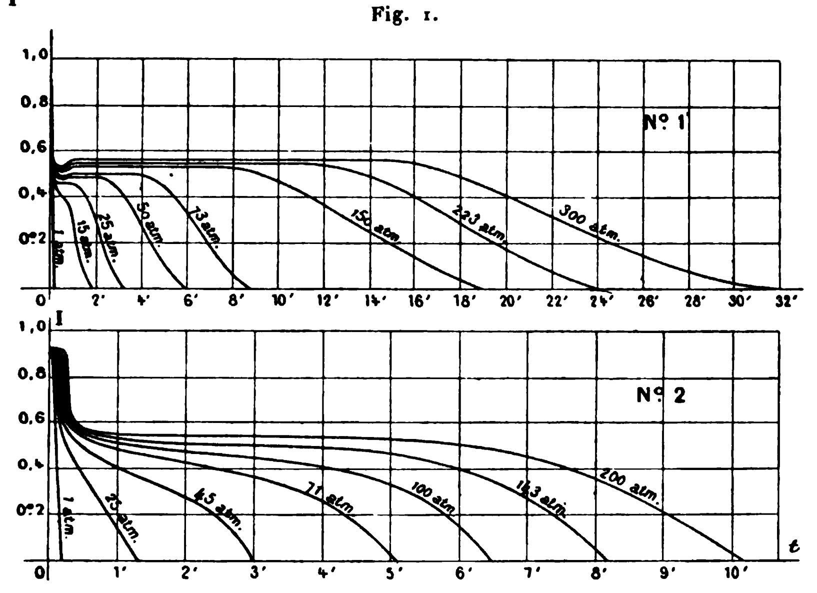
Si l'on opère sous des pressions plus élevées, l'allure de la décharge se modifie peu à peu et comprend trois périodes :

1° Une période de chute très rapide suivie d'une légère augmentation de l'intensité du courant;

2° Une période d'intensité constante. Cette intensité augmente un peu avec la pression. Pendant cette période, la force électromotrice de l'appareil est voisine de 1 volt.

3° Enfin une nouvelle période de chute moins rapide que la première.

Fig. 1.



Si l'on calcule la capacité de l'accumulateur ainsi formé, en la rapportant à 1^{kg} de mousse de platine, on trouve qu'elle est de 56 ampères-heure, pour une pression de 580^{atm}. [On sait que la capacité pratique des accumulateurs industriels au plomb varie de 10 à 20 ampères-heure par kilogramme (1).]

Quant à l'intensité du courant de décharge, elle peut atteindre facilement 100 ampères par kilogramme.

---

(1) Il est bien entendu, ainsi que l'a fait remarquer M. Mascart à la suite de notre Communication à l'Académie, que le nombre que nous citons pour les accumulateurs industriels au plomb s'applique à leur capacité *pratique* rapportée

Dès le début de nos expériences, nous avons remarqué qu'en employant, pour les deux pôles, des quantités égales de mousse de platine, le dégagement des bulles d'hydrogène se produisait bien avant celui des bulles d'oxygène. Nous en avons conclu que, pour obtenir d'un poids donné de matière le meilleur rendement, il fallait le répartir en quantités inégales aux deux pôles. Nous avons trouvé que le rapport à adopter était de trois parties pour le pôle négatif contre une pour le pôle positif.

Enfin, nous avons cherché à nous rendre compte du rendement de l'appareil, c'est-à-dire du rapport de la quantité d'électricité restituée par la décharge à celle fournie pendant la charge. Nous avons trouvé que ce rendement atteint des valeurs élevées (95 à 98 pour 100), quand on ne pousse pas la charge à ses dernières limites et que la décharge lui succède immédiatement. Quand ces conditions ne sont pas remplies, l'accumulateur dissipe peu à peu sa charge en circuit ouvert, et le rendement diminue.

Nous avons soumis aux mêmes expériences plusieurs autres métaux de la famille du platine. M. Joly, directeur du Laboratoire de Chimie de l'École Normale supérieure, où nous avons fait ces recherches, a bien voulu en préparer spécialement pour nous les quantités nécessaires, et dans un grand état de pureté.

L'iridium nous a donné des résultats tout à fait analogues à ceux du platine.

Le ruthénium est légèrement attaqué au pôle positif par la liqueur acide qui se colore en brun foncé. Malgré cela, il condense aussi les gaz de l'électrolyse et fournit un accumulateur dont la capacité augmente avec la pression. Mais sa force électromotrice ne se fixe pas à une valeur constante. Elle décroît d'une manière continue de $1^{\text{volt}},6$ à zéro, sans manifester de tendance à rester stationnaire à aucun moment de la décharge, et cela aussi bien à la pression de 100^{atm} qu'à la pression ordinaire.

De tous les métaux voisins du platine, le palladium est celui qui nous a donné les résultats les plus intéressants. Les propriétés

---

au poids total de l'appareil et non au seul poids de matière active. On sait depuis longtemps qu'il est possible de construire des accumulateurs au plomb présentant une capacité plus élevée; mais cet avantage est contre-balancé par la mise hors de service très rapide de ces appareils.

condensantes pour l'hydrogène sont bien connues depuis les expériences de Graham. Ce physicien n'avait trouvé aucune trace d'oxygène condensé dans les expériences faites à ce sujet sur des lames ou des fils de ce métal. Nous avons vérifié, en effet, qu'un accumulateur formé de deux lames de palladium ne possède, même sous forte pression, qu'une capacité excessivement faible, à cause de la saturation presque immédiate de la lame positive qui laisse dégager l'oxygène libre aussitôt le courant de charge fermé.

En employant le métal à l'état de mousse (obtenue par la calcination du cyanure), les résultats ont été entièrement différents, et nous avons obtenu des effets bien supérieurs à ceux donnés par les autres métaux du minerai de platine.

Même à la pression ordinaire, l'accumulateur, après avoir donné, à la décharge, une période de chute rapide, puis une légère surélévation de l'intensité du courant, fournit un débit constant. (On a vu que la mousse de platine ne commence à donner ce résultat qu'à partir de 20^{atm} à 30^{atm}.) A mesure que la pression augmente, on observe les mêmes effets généraux qu'avec le platine; mais, à pression égale et à poids égal de matière active, la capacité de l'accumulateur est de trois à quatre fois plus grande.

Ainsi, sous la pression de 600^{atm}, cette capacité peut atteindre 176 ampères-heure par kilogramme de mousse de palladium.

L'or précipité du chlorure par le gaz sulfureux a été reconnu apte à former aussi un accumulateur de capacité variable avec la pression. Cette capacité est, d'ailleurs, plus faible que celle obtenue avec le palladium ou le platine. L'allure de la décharge est également un peu différente de celle que donnent ces métaux. (Voir les courbes ci-dessus, n° 2.)

Enfin, avec l'argent, l'étain, le nickel, le cobalt qui ont été essayés dans les mêmes conditions, il y a altération chimique du métal au pôle positif. Il en est de même avec le charbon sous ses divers états. On a bien encore une certaine accumulation d'énergie électrique dans ces corps, mais une forte pression ne donne aucune augmentation dans les résultats. Les effets observés sont probablement dus à une altération d'ordre chimique, comme celle à laquelle les accumulateurs au plomb doivent leurs propriétés. Pour le charbon, en particulier, le gaz qui se dégage au

pôle positif après la saturation n'est pas de l'oxygène pur, mais un mélange de ce gaz avec une très forte proportion d'acide carbonique. Ce résultat avait déjà été constaté ([1]).

En résumé, parmi les diverses substances essayées, les métaux nobles non susceptibles de s'altérer chimiquement au contact de l'électrolyte ou des produits de sa décomposition semblent seuls aptes à former des accumulateurs à gaz condensés dont la capacité augmente avec la pression. Pour quelques-uns de ces métaux, la capacité peut atteindre des valeurs élevées et notablement supérieures à celles que donnent, dans la pratique courante, les accumulateurs industriels au plomb.

Argenture des glaces à froid;

PAR MM. AUGUSTE et LOUIS LUMIÈRE.

On a indiqué jusqu'ici, pour l'argenture des glaces à froid, un certain nombre de procédés qui paraissent présenter l'inconvénient d'être compliqués et d'exiger des soins très minutieux.

En étudiant les propriétés de l'aldéhyde formique, nous avons remarqué que cette substance donne facilement, avec les solutions ammoniacales de nitrate d'argent, des miroirs adhérents susceptibles de polissage facile.

En opérant convenablement, nous avons remarqué que la plus grande partie de l'argent contenu dans les liqueurs argentiques se dépose sur les glaces, ce qui évite les résidus et diminue le prix de revient.

Le procédé est en outre des plus simples et nous a paru, pour ces motifs, intéressant à signaler.

Nous avons déterminé empiriquement les proportions relatives des réactifs et leur concentration; après un grand nombre d'essais nous nous sommes arrêtés à la méthode suivante :

On prend 100^{cc}, par exemple, d'une solution à 10 pour 100 de

---

([1]) DEBRAY et PÉCHARD, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. II, p. 27; 1887.

nitrate d'argent à laquelle on ajoute goutte à goutte une quantité d'ammoniaque juste suffisante pour dissoudre le précipité formé tout d'abord. On doit se garder d'avoir un excès d'ammoniaque qui nuirait à la formation du dépôt. On complète ensuite le volume à un litre par addition d'eau distillée et l'on obtient ainsi ce que nous appellerons la solution A.

D'autre part, on dilue, à l'aide d'eau distillée, la solution à 40 pour 100 de formaldéhyde du commerce, de façon à obtenir une dissolution à 1 pour 100. Cette dissolution, que nous appellerons B, se conserve assez longtemps, à raison de son degré de dilution.

On a pris la précaution de nettoyer parfaitement la surface à recouvrir en la frottant avec une peau de chamois imprégnée de rouge anglais et, au moment d'opérer, on prend :

Solution A.............	2 volumes
» B.............	1 volume

que l'on mélange rapidement, d'une façon complète, puis on verse ce mélange sur la glace à argenter, sans temps d'arrêt, en la recouvrant d'un seul coup.

Au bout de cinq à dix minutes, à la température de 15° à 19°, tout l'argent de la solution s'est déposé sur le verre en une couche brillante qu'on lave sous un jet d'eau. On laisse sécher et il ne reste plus qu'à vernir, si l'on utilise comme surface réfléchissante celle en contact avec le verre, ou à polir avec les précautions d'usage, dans le cas où l'on fait usage de la couche elle-même, ainsi que cela a lieu dans certains instruments astronomiques.

SÉANCE DU 16 NOVEMBRE 1894.

PRÉSIDENCE DE M. JOUBERT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 2 novembre est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. FROC (le Père), à l'Observatoire de Zi-Ka-Weï près Chang-Haï (Chine).
LUGGIN (Dr H.), au Laboratoire de M. le Professeur Arrhénius à Stockholm (Suède).
MAURIN (Charles), Agrégé, Préparateur au Collège de France.
PLACE (le marquis DE), Capitaine de Cavalerie à Paris.

M. Le Chatelier s'est proposé d'aborder l'étude de la constitution des alliages métalliques par des expériences sur leur fusibilité. Les expériences préliminaires dont il entretient la Société de Physique ont pour objet de montrer qu'il existe bien une relation entre la constitution chimique des mélanges et la forme de leur courbe de solubilité. Cette démonstration peut être faite par l'étude des mélanges salins dont la transparence permet, par l'emploi des procédés optiques, de déterminer avec certitude la constitution chimique.

Cette étude a donné pour les mélanges binaires les résultats suivants :

1° La courbe de fusibilité est composée de deux tronçons de courbes sensiblement rectilignes, se coupant à angle vif pour les sels dont les cristaux sont simplement juxtaposés après la solidification, sans combinaison ni mélange isomorphe.

2° La courbe de fusibilité est composée d'une courbe unique dans le cas des mélanges isomorphes.

3° La courbe de fusibilité est composée de trois ou quatre tronçons, se coupant à angle vif dans le cas où il se forme une combinaison définie des deux corps mêlés.

Si l'on étend ces lois aux alliages et si on les applique aux courbes de solubilité déterminées antérieurement par différents savants, on est conduit aux conclusions suivantes :

1° Les alliages de l'étain avec le bismuth, le plomb et le zinc sont constitués par la juxtaposition des cristaux isolément purs.

2° Les alliages d'or avec l'argent et le platine sont constitués par des mélanges isomorphes.

3° Les alliages d'or avec l'aluminium renferment une combinaison définie de ces deux métaux.

M. Wyrouboff fait observer, à ce propos, que les expériences de M. Le Chatelier confirment d'une façon remarquable des faits qu'il a signalés il y a de cela quelques années, et qui ont paru inadmissibles aux chimistes. Il avait affirmé entre autres, sans donner du reste de détails plus précis, que les couples SO^4K^2 et CO^3K^2; SO^4Na^2 et CO^3Na^2 pouvaient se mélanger en toutes proportions par la fusion et donner des mélanges dont les propriétés optiques présentent tous les passages possibles entre les propriétés des corps mélangés. Les observations si précises et si intéressantes de M. Le Chatelier donnent donc pleinement raison à son affirmation. M. Wyrouboff se propose d'ailleurs de publier prochainement ses expériences avec plus de détails qu'il ne l'a fait jusqu'ici.

M. Maumené fait observer que la plupart des sels étudiés par M. Le Chatelier ont entraîné des erreurs plus ou moins fortes dans les courbes construites d'après la supposition d'une stabilité parfaite des sels aux températures de leur fusion.

Ainsi le sulfate double de cuivre et de potasse, à peine fondu, subit la décomposition

$$\left.\begin{array}{l} SO^3CuO.SO^3KO \\ SO^3CuO.SO^3KO \\ SO^3CuO.SO^3KO \end{array}\right\} \text{ deviennent } \left.\begin{array}{r} SO^3CuO.SO^3\quad KO \\ CuO.SO^3SO^3KO \\ CuO.SO^3SO^3KO \end{array}\right\}.$$

La même décomposition ou une analogue se présente avec beaucoup de sels, notamment les aluns, à des températures de 100° seulement ou très peu au-dessus.

M. André Bidet a étudié les conditions nécessaires pour la formation de la coloration de certains composés organiques sous l'influence de l'air et de la lumière.

Il a rappelé ce fait d'observation courante, qu'un grand nombre de substances, naturelles ou artificielles, liquides ou solides, principalement de la série aromatique, prennent peu à peu des colorations brunes marquées sous l'action des rayons lumineux.

Ayant eu l'occasion d'obtenir quelques corps dans un état particulier de pureté, il a remarqué que ces corps ainsi purifiés ne se coloraient plus dans les conditions ordinaires. Afin de vérifier si ces cas isolés pouvaient offrir un caractère de plus grande généralité, plusieurs produits commerciaux ou de laboratoire, de fonctions différentes, furent soumis à des purifications très variées et poussées aussi loin que possible.

M. André Bidet a pu ainsi former à l'appui de ses recherches trois séries d'échantillons préparés depuis quatre ou cinq ans et qu'il présente aujourd'hui à la Société.

La première série se compose des produits commerciaux les plus purs conservés dans l'obscurité et demeurés incolores; dans la deuxième, ces mêmes produits, exposés à la lumière, ont tous pris une coloration caractéristique; enfin la troisième renferme les échantillons purifiés, exposés à la lumière et restés incolores.

Il en résulte que ces divers composés aromatiques ne peuvent se colorer que si quatre facteurs se trouvent en présence : une substance organique oxydable, un agent oxydant tel que l'air dans ces recherches, l'action des rayons lumineux et enfin l'intervention de matières étrangères qui sont éliminées par les purifications successives.

M. Curie pense que les belles et patientes recherches de M. Bidet sont particulièrement suggestives pour les physiciens. Il a en effet établi rigoureusement, pour un grand nombre de corps organiques, que *les corps purs ne sont pas susceptibles de se colorer sans l'influence de la lumière.* — C'est une proposition qui, si elle est reconnue tout à fait générale, deviendra fondamentale pour le photographe. Il convient peut-être de rapprocher la proposition de M. Bidet d'une autre bien connue aujourd'hui des physiciens : c'est que *les corps purs ne conduisent pas*

l'électricité (il en est du moins ainsi pour les électrolytes et les diélectriques). On peut saisir par exemple le rapprochement à l'aide du raisonnement suivant : Les rayons lumineux qui provoquent une action chimique sont probablement absorbés; d'après la théorie de Maxwell, les corps qui absorbent la lumière sont conducteurs de l'électricité; si des corps conduisent l'électricité, c'est qu'ils ne sont pas purs. On retrouve ainsi la proposition de M. Bidet.

M. Berget présente, au nom de M. J. Richard, un appareil portatif de photographie nommé le *Vérascope*.

Cet appareil repose sur le principe du retour inverse des rayons lumineux; de la grandeur d'une jumelle de spectacle, il constitue, grâce à ses deux objectifs identiques, séparés l'un de l'autre par un écartement de 65^{mm}, et à un châssis à magasin, une petite chambre noire donnant des épreuves stéréoscopiques; mais ce qui constitue son originalité, c'est que les *mêmes* objectifs et la *même* chambre servent à examiner l'épreuve positive sur verre obtenue d'après le négatif direct; dans ces conditions, l'œil se trouve placé, par rapport à la plaque, dans les mêmes conditions que les objectifs par rapport à l'objet; celui-ci sera donc vu *sans déformation perspective,* avec son relief apparent conforme à la réalité : c'est là le côté très élégant de l'appareil de M. J. Richard.

M. Berget montre à la Société deux épreuves : l'une, du pavillon de Flore, très déformée par la perspective quand on regarde le cliché à l'œil nu, tout à fait exacte quand on la regarde dans le vérascope; l'autre est un instantané pris aux courses de Longchamp.

Sur la solubilité mutuelle des sels;

Par M. H. Le Chatelier.

La détermination des courbes de solubilité mutuelle des sels, ou, ce qui revient au même, des courbes de fusibilité des mélanges salins, comprend trois cas distincts :

1° Le cas où les deux sels se solidifient isolément;

2° Le cas où les deux sels peuvent donner une combinaison définie;

3° Le cas où les deux sels mêlés se solidifient ensemble en formant des mélanges isomorphes de composition variable.

Premier cas : *Sels se solidifiant isolément.* — Lorsque les

deux sels se solidifient isolément, on a pour chacun d'eux la relation approchée

$$0{,}002 \log \text{nép}\, s + \frac{L}{t} = \frac{L}{t_0},$$

en appelant L et t_0 la chaleur latente et la température de fusion du sel considéré.

D'après la définition même du coefficient de solubilité, les seules portions de la courbe théorique définie par cette équation qui puissent correspondre à un phénomène réel sont celles qui sont comprises entre les abscisses $s = 0$ et $s = 1$.

Pour le second sel on aurait une relation semblable, que l'on peut écrire, en remarquant que $s' = 1 - s$,

$$0{,}002 \log \text{nép}(1 - s) + \frac{L'}{t} = \frac{L'}{t'_0}.$$

Les courbes définies par ces deux équations se coupent en un point qui limite la portion utile de chacune d'elles. Celles-ci sont ainsi comprises entre leur point d'intersection commun et le point de fusion de chacun des sels aux ordonnées $s = 0$ et $s = 1$. Les branches asymptotiques inférieures correspondent à un état d'équilibre instable qui est expérimentalement irréalisable.

En résumé, la courbe de solubilité d'un mélange de deux sels qui ne donnent ni combinaison, ni mélange isomorphe, se compose essentiellement de deux branches se coupant à angle vif. L'une de ces branches correspond au dépôt exclusif de l'un des sels et de même pour l'autre. Au point d'intersection, les deux sels se déposent simultanément dans les proportions mêmes où ils se trouvent dans le liquide; la température de solidification reste constante, c'est le mélange *eutectique*. En dehors de ce point, le dépôt exclusif de l'un des sels fait varier la composition du liquide, en abaisse progressivement la température de solidification jusqu'à celle du mélange eutectique.

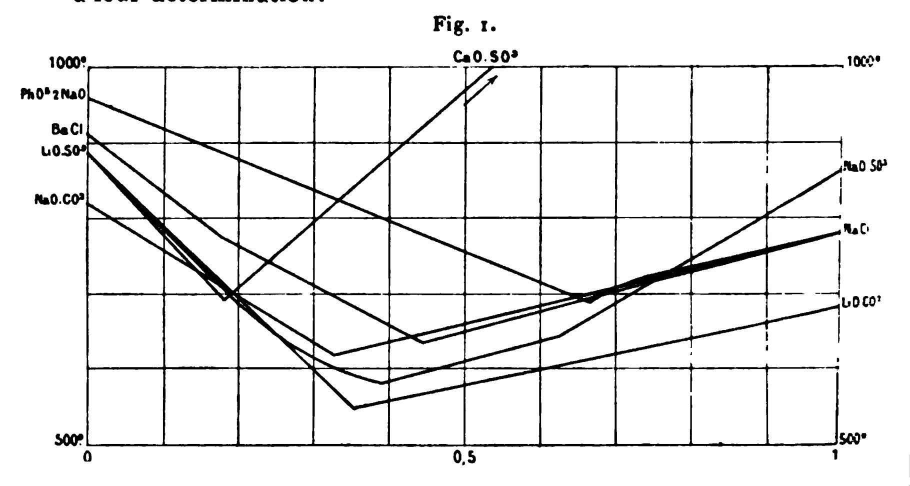
Les courbes ci-après résument quelques résultats relatifs à la solubilité du chlorure de sodium et du sulfate de lithium en présence de différents sels; on voit, comme le faisait prévoir la formule, que les résultats sont sensiblement indépendants de la nature du dissolvant. On peut représenter ces résultats d'une façon satisfai-

sante en attribuant à ces deux sels les chaleurs latentes de fusion suivantes :

$NaCl$(58gr,5).... 12cal,6 LiO, SO^3(55gr).... 2cal,84

Je me propose de mesurer ultérieurement ces chaleurs latentes pour contrôler l'exactitude des calculs théoriques qui ont conduit à leur détermination.

Fig. 1.



On remarquera sur ces courbes, outre le point anguleux correspondant au mélange eutectique, un point semblable sur la branche du chlorure de baryum qui correspond à une transformation allotropique de ce sel (775°), et sur la courbe N, O, SO^3 — LiO, SO^3, des points anguleux se rattachant à la formation d'un sel double.

Deuxième cas : *Sels formant des combinaisons définies.* — J'ai démontré antérieurement, pour les solutions aqueuses, que chaque corps différent ou chaque état différent d'un même corps avait une courbe de solubilité distincte; la même démonstration est valable pour les mélanges salins. Par conséquent, deux sels qui fourniront entre eux une seule combinaison définie auront une courbe de fusibilité composée de trois branches distinctes, l'une correspondant à la cristallisation de l'un des sels simples, la seconde à la cristallisation de l'autre sel simple, et la troisième à celle du sel double.

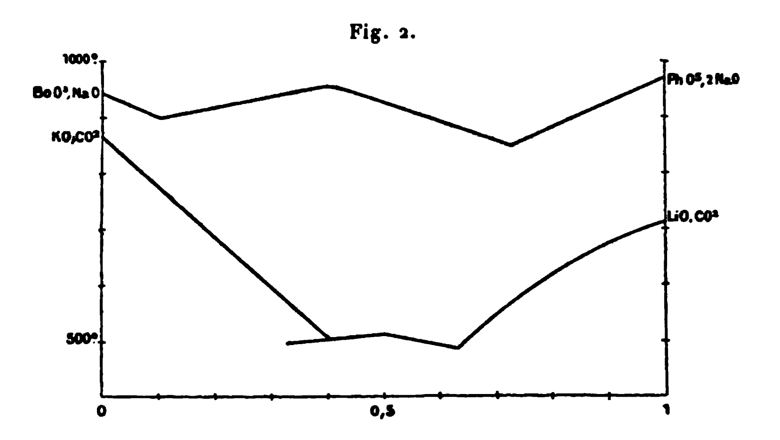
Je n'ai pas à revenir ici sur la forme des courbes relatives aux

deux sels simples; elle est la même que si le sel double n'existait pas. Celle du sel double a nécessairement une forme différente; sa température de cristallisation la plus élevée est celle qui correspond à sa fusion simple, puis cette température s'abaisse progressivement par l'addition au mélange de quantités croissantes de l'un ou l'autre des sels composants et tend, dans les deux cas, à se rapprocher du zéro absolu quand la proportion dans le mélange de l'un ou l'autre des sels simples tend à s'annuler. Les trois courbes présenteront, deux à deux, un certain nombre de points d'intersection qui limiteront les régions utiles de chacune d'elles. Les portions de ces courbes correspondant à un état d'équilibre stable sont nécessairement celles qui, pour un mélange donné, correspondent à la température de cristallisation la plus élevée, dans le cas du moins où la cristallisation est accompagnée d'un dégagement de chaleur. Suivant la position relative de ces trois courbes la cristallisation du sel double se produira entre des limites de concentration plus ou moins étendues, ou même ne se produira pas du tout si sa courbe est entièrement inférieure à celle des sels simples. C'est là l'explication de ce fait bien connu, que certains sels doubles ne peuvent être obtenus par fusion, tandis qu'on les prépare facilement à plus basse température en présence de dissolvants appropriés. Lorsqu'une portion de la courbe du sel double dépasse celle des sels simples, tantôt son sommet, c'est-à-dire le point de fusion du sel double isolé, sera sur cette partie stable de la courbe et le sel double pourra être fondu sans décomposition, tantôt il sera en dehors et, dans ce cas, la fusion du sel double sera accompagnée de la précipitation de l'un des sels simples. Ce second cas est celui de la plupart des hydrates salins qui prennent naissance dans les dissolutions aqueuses, tel le sulfate de soude hydraté qui fond à 33° en laissant déposer une certaine quantité du sel anhydre. Le premier cas est tout à fait exceptionnel pour les solutions aqueuses : il a été découvert par M. Bakkhuis Roozeboom dans les hydrates du chlorure de calcium et du chlorure ferrique, auxquels on peut encore ajouter l'hyposulfite de soude. Pour les mélanges salins, au contraire, ce cas semble être le plus fréquent; c'est du moins celui que j'ai rencontré jusqu'ici le plus souvent. J'en donnerai deux

exemples se rapportant l'un au carbonate double de potasse et de lithine, l'autre à un borophosphate de soude.

Ces résultats sont représentés par les courbes ci-dessous.

Fig. 2.



Le carbonate double potassico-lithique est un sel parfaitement cristallisé, possédant une double réfraction énergique, se décomposant rapidement au contact de l'eau. Il résulte de l'union à équivalents égaux des carbonates simples.

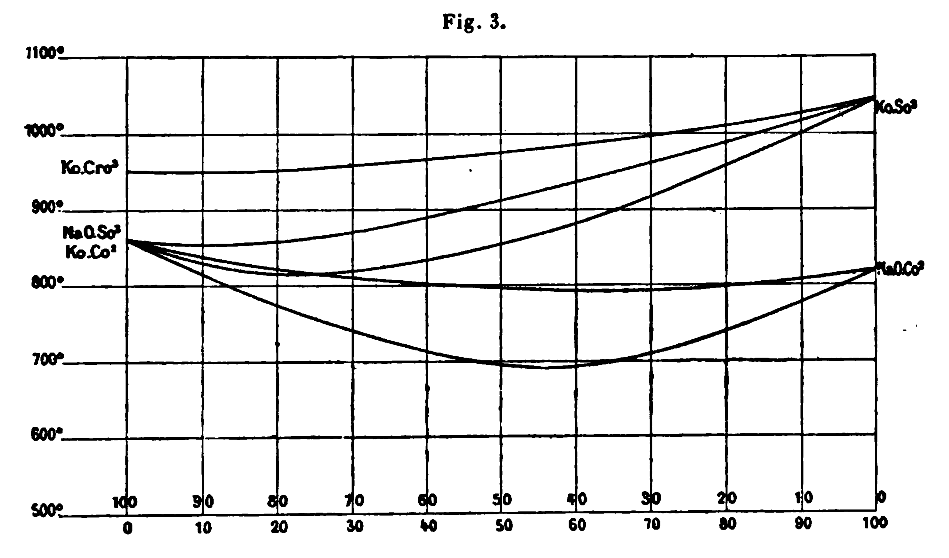
Le borophosphate de soude est caractérisé par son absence d'action sur la lumière polarisée, ce qui le différencie nettement des deux sels simples constituants. Mais il subsiste une certaine incertitude sur sa formule; en la déterminant d'après la position du point de fusion le plus élevé, on n'arriverait à aucun résultat simple : c'est là une question que je chercherai à élucider ultérieurement.

Les mélanges de carbonates de potasse et de lithine ont donné lieu à un phénomène de sursaturation intéressant qui a permis de prolonger la courbe du sel double, comme on s'en rend compte sur la figure, un peu au delà de son intersection avec la courbe du carbonate de potasse. C'est un résultat analogue à celui que l'on obtiendrait si l'on pouvait refroidir une dissolution de chlorure de sodium au-dessous du point de congélation de son cryohydrate ou mélange eutectique, — 21, en lui conservant l'état liquide.

Troisième cas : *Sels formant des mélanges isomorphes.* — J'appelle *isomorphes* les corps qui ont la propriété, quelle que soit d'ailleurs leur constitution chimique, de cristalliser ensemble en proportions variant d'une façon continue, ce que l'examen des propriétés optiques permet de reconnaître d'une façon certaine. Mes expériences ont porté sur des couples salins dont l'isomorphisme m'avait été signalé par M. Wyrouboff.

Les données numériques sont résumées dans les courbes ci-dessous.

Fig. 3.



Fusibilité des mélanges salins isotropes.

M. Berthelot, au cours d'une étude sur les chaleurs de formation des mélanges salins obtenus par fusion ignée, a signalé l'existence de carbonates doubles alcalins et alcalino-terreux. J'ai pensé que ces sels pourraient fournir un nombre assez grand de composés isomorphes dont les mélanges seraient intéressants à étudier. L'expérience m'a montré que les carbonates de potasse et de soude donnaient facilement, par fusion avec les carbonates de baryte, de strontiane et de chaux, des sels doubles bien cristallisés et isomorphes. Leur formule est représentée en équivalents par la formule

$$M'O, M''O, C^2O^4.$$

Ils sont facilement clivables; les lames de clivage examinées en lumière convergente sont uniaxes négatives, l'axe étant perpendiculaire au plan de clivage. Ces composés se conservent sans altération à l'air; chauffés au-dessus de leur point de fusion, ils se décomposent facilement en abandonnant de l'acide carbonique. Les composés renfermant de la baryte sont, contrairement aux prévisions, plus facilement décomposables que ceux qui renferment de la chaux.

Les courbes ci-dessous résument les températures de cristalli-

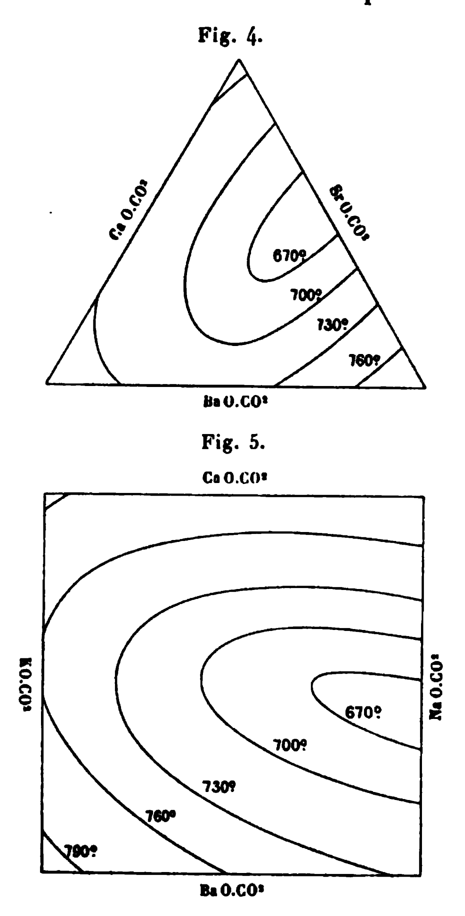


Fig. 4.

Fig. 5.

sation de mélanges ternaires renfermant du carbonate de soude associé aux trois carbonates alcalino-terreux, et de mélanges qua-

ternaires renfermant les carbonates de potasse et de soude associés aux carbonates de chaux et de baryte :

Mélanges ternaires......... $NaO, (Ca, Sr, Ba)O, C^2O^4$
» quaternaires...... $(Na, K)O, (Ca, Ba)O, C^2O^4$

Les expériences sur la fusibilité des mélanges isomorphes binaire, ternaire et quaternaire conduisent aux conséquences suivantes : Pour tous ces mélanges dont l'isomorphisme a pu être contrôlé expérimentalement, c'est-à-dire pour les cinq premiers mélanges binaires qui avaient antérieurement été étudiés optiquement par M. Wyrouboff et pour les mélanges ternaires et quaternaires de carbonates doubles, les courbes et surfaces sont absolument continues sans aucun point anguleux.

SÉANCE DU 7 DÉCEMBRE 1894.

Présidence de M. Joubert.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 16 novembre est lu et adopté.

Est élu membre de la Société :

M. Peyrard (Henri), Répétiteur au Lycée Lakanal, à Sceaux (Seine).

M. Maumené, qui a fait une Communication en mars dernier ayant pour but de montrer que les actions chimiques sont déterminées par les énergies physiques, et d'en donner une première preuve en étudiant la loi des actions de mélange, présente une seconde preuve donnée par la loi des actions de contact.

Il examine l'application de cette loi aux gaz. Comme premier exemple il cite la production du chlorure de chaux; le calcul fondé sur la liquéfaction (et solidification) du chlore et son action à volumes égaux avec la chaux hydratée commande la formule $CaCl + ClO.CaO + CaO(HO)^2$. Cette formule représente :

		Analyse de Kolbe (réduite).
Cl	39,02	39,01
CaO	46,20	46,17
HO	14,80	14,82
	100,00	100,00

Donc le gaz agit bien à volumes égaux, à froid.

2ᵉ *Exemple.* — Production du phosphure de chaux.
Les volumes

Du phosphore liquide..................	17,8
De la chaux anhydre..................	8,81

donc le produit formé doit contenir un atome (dit équivalent) de Ph et deux atomes de CaO, soit $Ph.(CaO)^2$; l'analyse a donné ce résultat très précis à M. le baron Arnould Thenard.

Ici la loi trouve encore sa rigoureuse application et cette fois à la chaleur rouge.

3ᵉ *Exemple.* — D'après l'auteur, les mêmes principes s'appliqueraient encore à l'action de l'hydrogène sur l'oxygène; il fait voir que l'on peut admettre que les quantités de ces deux gaz qui réagissent pour former de l'eau sont précisément celles qui auraient des volumes égaux à l'état liquide : ainsi la composition de l'eau serait prévue par les lois générales énoncées par l'auteur.

Sur la constitution des cryohydrates. — M. Ponsot fait l'historique de la question. Il indique que, malgré les études théoriques de divers auteurs, quelques savants admettent encore l'existence des *cryohydrates* de Guthrie. Ce qui l'amène à exposer les résultats de quelques expériences qu'il avait faites en 1890 et à confirmer la théorie.

Il montre que si, une dissolution a la concentration cryohydratique et se trouve à la température cryohydratique, on peut y faire cristalliser soit la glace, soit le sel qui s'y trouve à saturation séparément ou simultanément : il suffit de refroidir lentement et d'ajouter des traces de sel ou de glace ou des deux à la fois.

Dans les conditions ordinaires, alors que la dissolution cryohydratique a été en surfusion et que la solidification se produit sans addition d'aucun germe, cette double cristallisation se produit aussi, mais il faut, pour distinguer les cristaux l'un de l'autre, examiner au microscope. Cela est très visible pour les sels colorés, tels que le permanganate de potasse, le bichromate de potasse, le sulfate de cuivre. Pour les sels incolores, il faut de plus employer la lumière polarisée.

Par fusion partielle et solidification lente plusieurs fois répétées on peut obtenir des cristaux assez gros pour pouvoir être séparés et caractérisés.

M. Ponsot montre les photographies des cristaux qu'il a obtenus (au laboratoire de recherches de la Sorbonne).

Conclusion. — Au point cryohydratique, la totalité ou une partie de l'eau de la dissolution se sépare en *glace* qui emprisonne des cristaux très petits d'un *sel anhydre* (chlorure de potassium) ou d'un *sel hydraté bien défini* (sulfate de cuivre). Ce sel qui cristallise est celui qui cristalliserait dans la dissolution par évaporation à la même température.

On devrait supprimer le mot *cryohydrate* et le remplacer par *cryosel*.

M. Ponsot pense que la dissolution dans laquelle se produisent en même temps de la glace et un sel est un *mélange* liquide de ces deux corps.

La cristallisation, dans les *cryosels composés,* de plusieurs sels en même temps que le dissolvant, peut être comparée à celle qui s'est produite dans les roches éruptives.

L'étude des cryosels pourrait être étendue avec profit aux corps organiques et avec d'autres dissolvants que l'eau.

M. Engel fait observer, à propos de l'intéressante Communication de M. Ponsot, que c'est à tort que ce savant lui attribue l'opinion que les cryohydrates de M. Guthrie constituent des *composés chimiques définis.*

1° Le procès-verbal de la séance du 3 novembre 1893 mentionne expressément que c'est *la solubilité,* au point de congélation de la solution saturée des chlorures, qu'il exprime en nombre de molécules d'eau fixées par une molécule de sel et non la composition chimique d'un hydrate défini.

2° Aucun des nombres cités n'est un nombre entier, comme l'exigeraient des hydrates définis.

3° L'expression d'hydrates définis n'est pas une seule fois employée par lui.

4° Enfin, dans une Note insérée aux *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (9 octobre 1893) M. Engel, à propos du point de congélation de la solution saturée, ajoute : « ou, ce qui revient au même, au point de fusion du mélange réfrigérant du sel considéré et de glace, etc. ».

M. Ponsot répond que l'idée qu'il a attribuée à M. Engel sur la nature des cryohydrates lui paraissait ressortir clairement de la Communication faite en novembre 1893, où il considérait le nombre de molécules d'eau *fixées* par 1 molécule de sel.

M. Wyrouboff ne méconnaît nullement l'intérêt des recherches de M. Ponsot, mais il désire faire observer qu'il y aurait lieu d'examiner de plus près la nature des cristaux formés, par l'étude des propriétés optiques, par exemple; il signale qu'il s'est ainsi occupé lui-même de la question, il y a déjà plusieurs années.

M. Ponsot a simplement voulu donner des preuves expérimentales que dans la congélation d'une dissolution au point cryohydratique, il se sépare toujours de la glace, qu'elle emprisonne des cristaux d'un sel anhydre ou d'un hydrate bien défini; ce sel anhydre ou hydraté cristalliserait dans la dissolution à la même température si l'on enlevait de l'eau par évaporation.

Il n'a pas eu connaissance de travaux de M. Wyrouboff relatifs aux cryosels.

Sur les cryosels (cryohydrates) ;

PAR M. A. PONSOT.

Quand on mélange un sel avec de la glace, une partie de celle-ci fond, du sel se dissout, et la température s'abaisse jusqu'à une valeur minimum, qui dépend de la nature du sel. Guthrie [1], soumettant à une température un peu plus basse la partie liquide obtenue, la fit solidifier; il remarqua que, pendant toute la durée de la solidification, la température demeurait invariable, que la partie solidifiée et la partie encore liquide avaient même composition, et que la partie solide était formée de lamelles cristallines. Il pensa que ces propriétés devaient caractériser une substance unique, un composé chimique, un hydrate du sel qu'il appela *cryohydrate* en raison des circonstances de sa formation. Il établit la formule d'un certain nombre de ces cryohydrates : exemple, $2NaCl, 21H^2O, KO, AzO^5 + 89, 2H^2O$, ...

Son interprétation fut critiquée à cause du nombre très grand, et souvent décimal, de molécules d'eau combinées à 1 molécule de sel [2], mais elle fut acceptée par beaucoup de savants, notamment par ceux qui admettent dans la dissolution l'existence d'hydrates plus compliqués.

En 1877, Guthrie [2] montra que les cryohydrates pouvaient être obtenus d'une autre manière : si, par exemple, on refroidit une dissolution saturée d'azotate de potasse, le sel cristallise d'abord, mais, lorsque la concentration s'est abaissée à 11,2 pour 100 et la température à $-2°,6$, il se forme une masse cristalline : c'est le cryohydrate qui se solidifie. Si l'on refroidit une dissolution étendue en présence de glace, il se forme d'abord de la glace, mais à $-2°,6$ c'est encore la masse cryohydratique qui se produit.

Pfaundler [3] fit remarquer que, pour lui, les cryohydrates, par suite même de cette nouvelle manière de les obtenir, ne devaient être autre chose que des mélanges de glace et de sel.

Cette dernière opinion pouvait trouver un commencement de

---

(1) *Philosophical Magazine*; 1875.
(2) *Journal de Physique.*
(3) *Berichte der deutschen Chemischen Gesellschaft*, t. X; 1877.

preuves dans les expériences de Rüdorff sur la congélation des dissolutions salines sursaturées, mais elle ne fut appuyée d'aucune observation directe. Aussi, tandis que MM. Mazotto (1890), Schreenemakers (1893), Duhem (1893), dans leurs travaux ou leurs études théoriques, admettent l'idée de Pfaundler, celle de Guthrie semble encore acceptée par MM. Etard (1889), Engel et Le Chatelier (1893 et 1894).

J'ai pensé qu'il était utile de publier les expériences que j'ai faites en 1890, ainsi que les considérations qui m'ont guidé.

Le point cryohydratique d'une dissolution d'un sel est une température donnée par la rencontre de deux lignes : l'une AB, dont les ordonnées représentent, à chaque température (abscisses) la concentration *maximum* de la dissolution, celle qui est établie en présence de sel solide; toute concentration dont le point figuratif est supérieur à AB est celle d'une dissolution *sursaturée;* l'autre CD dont les ordonnées représentent à chaque température la concentration *minimum* de la dissolution, celle qui est établie en présence de glace : toute concentration dont le point figuratif est inférieur à CD est celle d'une dissolution au-dessous de son point de congélation, ou si l'on veut *sursaturée* de glace.

D'après les expériences de M. Etard, la ligne AB est une ligne droite, si l'on exprime les concentrations par le nombre de grammes de sel existant dans 100^{gr} de dissolution; de plus, aux concentrations les plus faibles, elle s'éloigne toujours de l'axe des abscisses quand la température croît.

La ligne CD a une forme inconnue; mais on sait toutefois que la concentration croît toujours avec l'abaissement de température : d'où les deux lignes AB et CD se rencontrent toujours.

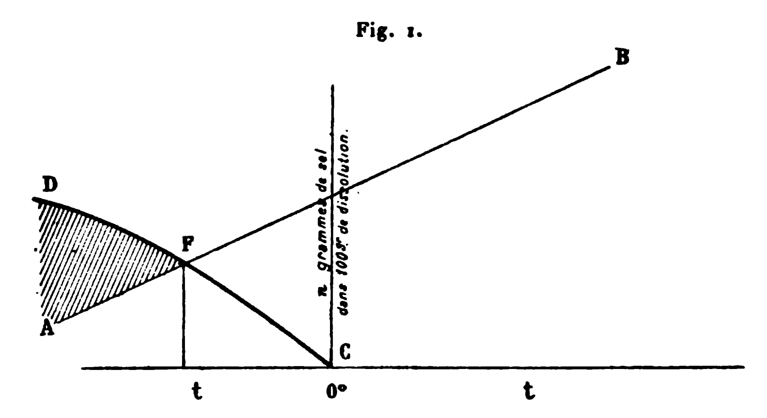
Toute dissolution dont la concentration est figurée par un point dans la région AFD est à la fois sursaturée de sel et de glace : en particulier, la dissolution avec la concentration cryohydratique refroidie au-dessous du point cryohydratique.

De là les expériences suivantes : on prépare par l'un des procédés de Guthrie une dissolution ayant exactement la composition cryohydratique.

1° Si l'on refroidit cette dissolution un peu au-dessous de son point cryohydratique et si l'on y ajoute une parcelle de glace, il se

forme des aiguilles transparentes plus légères que la dissolution : on ne peut affirmer qu'elles sont formées de glace pure;

Fig. 1.



2° Si l'on évapore une partie de la dissolution à la température cryohydratique, on obtient des cristaux du sel qui s'y trouve en dissolution saturée;

3° Si l'on ajoute quelques-uns de ces cristaux dans la dissolution cryohydratique, à la température cryohydratique, et si l'on refroidit très lentement, une partie du sel de la dissolution cristallise; mais ce phénomène ne se continue pas toujours seul, car il se produit bientôt une abondante formation d'aiguilles solides plus légères que la dissolution et formées certainement en grande partie par de la glace; si l'on continue de refroidir lentement en agitant, on voit la masse saline inférieure augmenter ainsi que la formation de glace à la partie supérieure.

Ces expériences, toutefois, ne sont pas concluantes, car on ajoute de la glace et un sel à la dissolution cryohydratique et de plus la nature des corps solides produits n'est pas suffisamment établie.

Que se passe-t-il dans les conditions ordinaires, alors que la dissolution cryohydratique est amenée en surfusion, un peu au-dessous de son point de congélation et que celle-ci se produit spontanément.

Après divers essais infructueux pour séparer dans la partie solide la glace et le sel que je supposais devoir se produire simultanément, j'eus recours à l'examen microscopique et, pour rendre

les résultats plus nets, j'examinai des dissolutions de sel colorés : le permanganate de potasse, le sulfate de cuivre, le bichromate de potasse.

Avec la dissolution de permanganate de potasse, aussitôt que la surfusion cesse, on voit se produire des aiguilles *transparentes, absolument incolores*, aux contours rectilignes ou arrondis, généralement en arborescences : c'est de la glace pure. Entre ces aiguilles se trouve une masse très colorée, encore liquide; mais, au bout de quelques instants, il se forme presque subitement dans cette masse des aiguilles très colorées, très fines en éventail ou en faisceaux (ce sont des cristaux de permanganate), tandis que l'espace intermédiaire devient transparent et incolore. Si l'on élève la température, une partie de la glace fond, redissout une partie des aiguilles de sel; mais, si l'on refroidit ensuite lentement, les aiguilles salines qui ont subsisté s'accroissent. Par plusieurs opérations identiques, on obtient des cristaux de plus en plus gros.

Les autres sels présentent les mêmes phénomènes. Pour observer les dissolutions de sels incolores, chlorure de potassium, azotate de potassium, j'ai employé la lumière polarisée. Les cristaux obtenus peuvent être étudiés optiquement et cristallographiquement : je me suis borné à les comparer à ceux obtenus par évaporation; je n'ai remarqué entre les uns et les autres aucune différence. Il m'a semblé qu'une étude plus complète serait superflue, les exemples choisis confirmant complètement les déductions de la théorie.

Les phénomènes observés au microscope m'ont conduit à isoler la glace du sel d'une manière plus simple : on met la dissolution cryohydratique dans un tube à essai; on la fait congeler presque totalement; on opère la fusion partielle surtout au milieu du tube à essai; on refroidit quand cette fusion s'est opérée jusque vers la partie inférieure; alors la glace restée à la partie supérieure s'accroît, tandis que des cristaux de sel se produisent dans la partie inférieure du tube; on répète plusieurs fois les mêmes opérations en agitant pendant le refroidissement.

Conclusions. — Les cryohydrates de Guthrie n'existent pas : ce sont des mélanges de glace pure et d'un sel solide. Le sel peut être anhydre, ou hydraté. Dans ce dernier cas, c'est un hydrate

bien défini, avec un nombre entier et généralement petit de molécules d'eau unies à 1 molécule de sel. Le sel qui se produit ainsi quand l'eau de la dissolution s'élimine sous l'état de glace est celui qui se produirait si l'on éliminait l'eau par évaporation à la même température.

Pour éviter toute confusion, il est bon de supprimer le mot *cryohydrate;* il peut être remplacé par celui de *cryosel.*

Il me semble qu'on peut admettre qu'une dissolution au point cryohydratique est un mélange liquide d'eau et du sel qui peut y cristalliser.

Lorsqu'on étudie les propriétés des dissolutions aqueuses d'un sel à diverses températures et avec des concentrations différentes, on est amené très souvent, pour expliquer ces propriétés, à faire des hypothèses sur le degré d'hydratation du sel dans ces dissolutions : ces hypothèses devront être rejetées si, au point de solidification du cryosel, elles ne conduisent pas à donner au sel dissous l'hydratation qu'il a dans ce cryosel.

MM. Mazotto et Schreenemakers ont étudié les cryosels formés par le mélange de deux sels avec la glace. Le dernier savant a montré que, si les deux sels ne peuvent pas former de sel double, ils ne forment qu'un seul cryosel; dans le cas contraire, ils en forment deux, et chacun est constitué par le sel double et l'un des deux sels composants qui est en excès.

Les cryosels formés par trois sels simples avec la glace n'ont pas été étudiés; mais, d'après les résultats précédents, on peut prévoir que leur nombre dépendra de celui des combinaisons qu'ils pourront former entre eux. Dans la formation lente de ces cryosels, on aura un exemple de plusieurs substances minérales cristallisant en même temps que leur dissolvant, et l'on pourra y voir une image de la solidification des roches éruptives.

La détermination de la température de formation d'un cryosel étant très facile, cette température pourra utilement être ajoutée aux constantes physiques d'un sel.

L'étude des cryosels pourra aussi être étendue avec profit à presque toutes les substances solubles dans l'eau. De plus, on pourra obtenir des mélanges analogues avec des dissolvants autres que l'eau.

SÉANCE DU 21 DÉCEMBRE 1894.

PRÉSIDENCE DE M. JOUBERT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 7 décembre est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. GIVERT, Professeur au Lycée de Bourges.
HEMARDINQUER, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Paris.

M. le PRÉSIDENT annonce les pertes douloureuses que la Société vient de faire dans les personnes du R. P. *Denza,* Directeur de l'observatoire de Rome, et de M. *G. Gaudin,* ancien élève de l'École Polytechnique, Professeur au Collège Stanislas.

M. le PRÉSIDENT donne lecture d'une lettre de M. le Ministre de l'Instruction publique et des Beaux-Arts annonçant que le 34e Congrès des Sociétés savantes est fixé dès maintenant au mardi 16 avril 1895. Ses travaux se poursuivront durant les journées des mercredi 17, jeudi 18 et vendredi 19 avril. M. le Ministre invite les délégués qui se sont inscrits comme devant participer au Congrès à lui faire connaître leurs communications écrites ou verbales.

On procède à l'élection de la *Commission des comptes :* MM. le colonel BASSOT, BORDET et POIRÉ sont élus pour vérifier les comptes de l'année 1894.

M. LIPPMANN présente une forme nouvelle de l'expérience de M. Otto Wiener.

On sait que M. Wiener a montré que l'interférence entre un rayon incident et le rayon réfléchi, quand l'incidence est de 45°, ne produit de franges stationnaires que dans le cas où la lumière incidente est polarisée dans le plan d'incidence.

On peut mettre en évidence l'existence de ces franges en appliquant au cas de la lumière polarisée le dispositif ordinaire de la Photographie en couleurs qui utilise, en lumière naturelle, les franges de Fizeau.

Voici le dispositif de l'expérience : une fente éclairée, placée au foyer d'une lentille, fournit un faisceau parallèle qu'un prisme biréfringent décompose en deux spectres. Une lentille donne, de ces deux spectres, deux images réelles qu'on reçoit sur une glace sensible préparée par la méthode de M. Lippmann ; cette glace est appliquée, à l'aide de glycérine, contre la face hypoténuse d'un prisme à réflexion totale, dont l'une des autres faces est placée normalement au faisceau incident.

On voit que, dans ces conditions, on peut même se dispenser de la lame réfléchissante de mercure adossée à la couche sensible, la réflexion totale sur cette dernière tenant lieu de miroir.

On obtient ainsi, sur l'épreuve, deux photographies spectrales juxtaposées; comme le fait prévoir la théorie, une seule présente des couleurs: celle qui correspond à la lumière polarisée dans le plan d'incidence; l'autre a l'aspect d'une photographie ordinaire.

M. Lippmann fait, sur l'écran blanc, la projection d'une des épreuves ainsi obtenues, montrant que l'une seulement des deux photographies est colorée. Il fait remarquer en terminant que, si la projection se faisait sous l'angle de 45° sous lequel la photographie a été faite, les couleurs du spectre coloré seraient rigoureusement à leurs places respectives.

M. Raveau présente une observation relative à l'interprétation de l'expérience de M. Wiener. La théorie électromagnétique considère dans la lumière deux quantités dirigées, ayant chacune un sens physique concret : la force électrique et la force magnétique; dans l'ignorance absolue où nous sommes du mécanisme des actions photochimiques, il est permis de supposer que ce mécanisme n'est pas le même pour tous les corps et que la force magnétique peut, dans certains cas, jouer un rôle prépondérant. Il serait intéressant de répéter l'expérience de M. Wiener ou de M. Lippmann en variant la substance sensible et en s'adressant en particulier aux sels de fer. Il existe peut-être des substances magnétiques pour lesquelles les franges (ou les couleurs) apparaîtraient sur la partie de la plaque où les corps employés jusqu'ici auraient subi une attaque uniforme.

M. P. Janet communique à la Société l'application qu'il a faite de la méthode électrochimique, précédemment indiquée par lui (*Bulletin de la Société de Physique,* mai 1894) à la détermination de la forme des courants périodiques en fonction du temps. Après avoir rappelé en quelques mots le principe de la méthode, et ses applications aux mesures de fréquences et de différences de phases, et indiqué quelques expériences intéressantes que l'on peut exécuter au moyen de cette méthode (reproduction de son correspondant au courant alternatif au moyen du téléphone, éclairage stroboscopique pendant l'inscription au moyen d'un tube de Geissler), l'auteur arrive à la description des expériences qui font l'objet propre de sa Communication. La discussion des conditions dans lesquelles s'inscrivent les traces bleues imprimées par le style sur le papier montre que ces traces sont représentées en grandeur et en position par les segments de droites interceptés sur la courbe représentative du courant par une certaine droite parallèle à l'axe des temps. Si à côté du premier style on en dispose un autre présentant sur le premier un excès de potentiel constant, les traces bleues obtenues sont plus longues : elles représentent les segments interceptés sur la même courbe par une seconde droite parallèle à la première et située un peu au-dessous.

Au moyen d'une série de styles équidistants présentant par rapport au premier des excès (ou des défauts) de potentiel variant en progression arithmétique, on obtient une série de hachures bleues, parallèles, dont les extrémités dessinent la courbe cherchée.

A propos de l'historique de la question, M. P. Janet rappelle qu'il avait abordé autrefois le problème de l'inscription autographique des courants alternatifs par une méthode toute différente, dérivée de la méthode classique et bien connue de M. Joubert : le principe des expériences consistait à rendre lentement mobile le contact fixe des expériences de M. Joubert, de façon à transformer la méthode en méthode stroboscopique ([1]). L'appareil destiné à la mise en œuvre de cette méthode, et construit avec une grande perfection par MM. Badier et Paulin, de Grenoble, figura à l'Exposition de la Société de Physique de 1892. Mais, dans l'intervalle, M. Blondel avait publié ses intéressants travaux fondés sur une méthode analogue, de sorte que l'auteur abandonna cette méthode. Il reprit la question dès qu'il fut en possession de la méthode électrochimique, et ce sont ces nouvelles études qui l'ont amené aux résultats exposés dans la Communication de ce jour.

([1]) Procès-verbaux des séances de la Société de Physique, 20 mars 1891; *Revue générale des Sciences*, 30 mars 1891.

ERRATA.

Pages.	Lignes.	*Au lieu de*	*Lire*
236	15, 18, 19	τ	r
251	6	Weatstone	Wheatstone
252	6	aa'	$a - a'$

OUVRAGES REÇUS PAR LA SOCIÉTÉ

PENDANT L'ANNÉE 1894.

Actes de la Société scientifique du Chili, fondée par un groupe de Français. — 3e année, t. III, 1893, et t. IV, 1re et 4e livraison, 1894; in-4°.

Almanach-Annuaire de l'Électricité et de l'Électrochimie. — Année 1894. Publié par M. Firmin Leclerc ; vol. in-18.

American Journal of Science (the). — 3e série, vol. XLVII et XLVIII, 1894; in-8°.

Annalen der Physik und Chemie, neue Folge. — Band XLVIII und XLIX, 1894; in-8°.

Annales de Chimie et de Physique. — 7e série, t. I, II et III, 1894; 3 vol. in-8°.

Annales de la Faculté des Sciences de Marseille. — T. IV, 1894; 1 vol. in-4°.

Annales de l'École polytechnique de Delft. — T. VIII, 1894, 1re et 2e livraison; in-4°.

Annales de l'Institut météorologique de Roumanie. — Publié par S.-C. Hepitès, t. VIII, 1892; 1 vol. in-4°.

Annales de la Société scientifique de Bruxelles. — 1887 à 1894; 8 vol. in-8°.

Annales télégraphiques. — 3e série, t. XXI, année 1894; in-8°.

Annuaire pour l'an 1894 avec des Notices scientifiques. — Publié par le Bureau des Longitudes. Paris, Gauthier-Villars et fils; in-18.

Archives des Sciences physiques et naturelles de Genève. — T. XXXI, 1894; in-8°.

Archives d'Électricité médicale, expérimentale et clinique. — Publiées par J. Bergonié, 2e année, 1894; 1 vol. in-8°.

Astronomical Society of the Pacific (publications of the). — T. VI, 1894; in-8°.

Astronomy and astro-physics, vol. XIII, année 1894. Charleton College Northfield, Minn.; in-8°.

Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie. — Band XVIII, 1894; in-8°.

Boletin de la Sociedad nacional de mineria de Santiago de Chile. — T. V, année 1894; in-4°.

Boletin mensual del Observatorio meteorologico del Colegio pio de Villa Colon. — Montevideo, année 1894; 1 vol. in-8°.

Bulletin de la Société belge d'Électriciens. — T. XI, année 1894; in-8°.

Bulletin de la Société française de Minéralogie. — T. XVII, année 1894; in-8°.

Bulletin de la Société internationale des Électriciens. — Année 1894; in-8°.

Bulletin de la Société nationale d'encouragement pour l'Industrie nationale. — T. VIII, 4e série, 1894; in-4°.

Bulletin de la Société philomathique de Paris. — 8e série, t. VI, 1893-1894; in-8°.

Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles. — 3e série, vol. XXX, année 1894.

Bulletin de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore. — 2e série, année 1894; in-8°.

Bulletin international de l'Académie des Sciences de Cracovie. — Année 1894; in-8°.

Bulletin international de l'Électricité. — Année 1894; in-4°.

Bulletin mensuel de l'École de Physique et de Chimie industrielles. — 5e année, n° 2, février 1894; in-8°.

Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences; t. CXVIII et CXIX, 1894; in-4°.

Electrician (The). — Vol. XXX, et XXXI, 1894; in-4°.

Électricien (L'). — Revue internationale de l'Électricité et de ses applications. 2e série, t. VI, année 1894; in-8°.

Fortschritte der Physik im Jahre 1889 et 1893. Dargestellt von der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin; in-8°.

Industrie électrique (l'). — Revue de la Science électrique et de ses applications industrielles, t. III, année 1894; in-4°.

Institut météorologique du Danemark. — Annales de l'observatoire magnétique de Copenhague, publiées par M. Paulsen, année 1892; 1 vol. in-4°.

Journal de Physique théorique et appliquée, fondé par J.-Ch. d'Almeida et publié par MM. E. Bouty, A. Cornu, E. Mascart, A. Potier. 3e série, année 1894; 1 vol. in-8°.

Journal de Physique, Chimie et Histoire naturelle élémentaires. — Publié par M. A. Buguet. 8e année, 1894; 1 vol. in-8°.

Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales.— Vol. XXVII, 1893; 1 vol. in-8°.

Journal of the Franklin Institute (The). — T. CXXXVII et CXXXVIII, 1894; in-8°.

Journal de la Société Physico-chimique de Saint-Pétersbourg. — T. XXVI, 1894; in-8°.

Journal of the Institution of Electrical Engineers including original Communications on Telegraphy and Electrical Science. — Vol. XXIII, 1894; in-8°.

Mémoires de la Société d'Émulation du Doubs. — 6e série, VIIe vol., 1892. Besançon, Dodivers et Cie, 1893; 1 vol. in-8°.

Memoirs and Proceedings of the Manchester Litterary and philosophical Society. — T. VIII, année 1893-94; in-8°.

Mémoires et Comptes rendus des travaux de la Société des Ingénieurs civils. — 4e série, 47e année, année 1894.

Mémorial des Poudres et Salpêtres. — Publié par les soins du Service des Poudres et Salpêtres avec l'approbation du Ministre de la Guerre. Paris, Gauthier-Villars et fils. T. I (1882-1883) à t. VI (1893); 6 vol. in-8°.

Memorias y revista de la Sociedad cientifica « Antonio Alzate » (Mexico); t. VII, 1893; in-8°.

Ministère de l'Instruction publique. — Revue des Travaux scientifiques, t. XIV, 1892; in-8°.

Mittheilungen der deutschen mathematischen Gesellschaft. — In Prag, 1892; in-8°.

Moniteur industriel. — Vol. XXI, année 1894; in-4°.

Nature (de Londres). — Vol. XLIX, 1894; in-4°.

Nuovo Cimento (Il). — 3e série, t. XXXV, 1894; 1 vol. in-8°.

Paris-Photographe. — Publié par M. Nadar, année 1894; 1 vol. in-8°.

Philosophical Magazine and Journal of Science. — Fifth series, vol. XXXVII and XXXIX, 1894; 2 vol. in-8°.

Philosophical Review (The). — A Journal of experimental and theoretical Physics, publié par M. Nichols. T. I, 1893 et t. II, 1894; 1 vol. in-8°.

Physikalische Technischen Reischsanstalt. — Wissenschaftliche Abhandlungen der Physikalische Technischen Reichsanstalt. Band I. Berlin, Julius Springer, 1894; 1 vol. in-4°.

— 5e Bericht über die Thätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (December 1892 bis Februar 1894) (Ext. *Zeitschrift für Instrumentenkunde;* 1894). In-8°.

— Die Thätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in den Jahren 1891 und 1892. (Ext. *Zeitschrift für Instrumentenkunde;* 1893). In-8°.

Proceedings and Transactions of the Nova Scotian Institute of natural Science of Halifax, Nova Scotia. — Vol. I, IV. Part I et II, 1890-1891; et Part III, 1892-1893; in-8°.

Proceedings of the Physical Society of London. — Vol. XII, Part IV et Vol. XIII, Part I; in-8°.

Proceedings of the American Academy of Arts and Science. — New serie, vol. XX. Whole series, vol. XXVIII, from may 1892 to may 1893 and vol. XXIX, from may 1893 to may 1894; 2 vol. in-8°.

Proceedings of the American Philosophical Society held at Philadelphia for promoting useful knowledge. — Vol. XXI, n°s 140 à 142, année 1893; in-8°.

Proceedings of the Royal Society. — Vol. LV et LVI, 1894; in-8°.

Proceedings of the Royal Society of Edinburg. — Vol. XIX, 1891-1892. In-8°.

Publications of the Lick observatory. Vol. II, 1894 et vol. III, 1894; in-4°.

Revue générale des Sciences pures et appliquées. — Publiée par M. Louis Olivier, 5e année, 1894; in-4°.

Revue industrielle (la). — Année 1894; in-4°.

Revue des questions scientifiques. — Publiée par la Société scientifique de Bruxelles. T. I à III et t. V, 1894. T. I 2e livraison, avril 1892, et t. III à VI, 1892-1894; in-8°.

Rosprawy Akademii Umiejetnosci Wydziall Matematyczno-Przyrodciczy. (Académie des Sciences de Cracovie.) — Seyria 2, t. VI. Krakowie, 1893; 1 vol. in-8°.

Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society (The).— Vol. VIII, Part 1 et 2; in-8°.

Scientific Transactions of the Royal Dublin Society (The). — Vol. V, Part 1 à 4; in-4°.

Smithsonian Institution. — Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution showing the operations, expenditures, and condition of the Institution for the year ending june 30 1891 and the year ending june 1892. Report of the U. S. National Museum. — Washington, Government Printing office, 1892; 2 vol. in-8°.

Société nationale d'encouragement pour l'Industrie nationale.— Procès-verbaux des séances. Année 1893; in-8°.

Technology quarterly and Proceedings of the Society of Arts. — Vol. VI, 1893 et vol. VII, 1894; in-8°.

Transactions of the Royal Society of Edinburg. — Vol. XXXVII, Part 1 et 2, 1893; 2 vol. in-4°.

Transactions of the technical Society of the Pacific Coast. — Francisco, California. Vol. X, n° 12, january 1894; in-8°.

United States coast and Geodetic survey. — Bulletin, n°s 28 à 31, 1893-1894; in-4°.

United States coast and Geodetic survey. — Report of the Superintendent of the U. S. Coast and geodetic Survey for the fiscal year ending June 30, 1891, in two Part. Part II. Appendices relating to the methods, discussions and results of the Coast and geodetic Survey. Washington, Government printing office, 1892; 1 vol. in-8°.

Billy (E. de). — Fabrication de la Fonte (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Bouasse (H.). — Études des actions photographiques (Extr. *Ann. de la Faculté des Sciences de Marseille*, t. VIII), 1894; in-4°.

Brisse (Ch.) et **Rivière (Ch.).** — Cours de Physique à l'usage des élèves de la classe de Mathématiques spéciales; par Ch. Brisse et Ch. André. 3e édition; Paris, Delagrave, 1894; 1 vol. in-8°.

Broca (André). — Études physiologiques, physiques et chimiques sur la vision des éruptions cutanées. Paris, L. Battaille et Cie, 1893; br. in-8°.

Bloch (F.) — Eau sous pression. — Appareils producteurs d'eau sous pression (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Blondel (André). — Théorie des projections électriques. Paris, Lahure, 1894; br. in-8°.

Bouloin (R.). — Traité élémentaire d'Électricité pratique. 2e édition, revue et augmentée. Bruxelles, A. Manceaux, 1894; 1 vol. in-18°.

Bureau international des Poids et Mesures. — Notice sur les thermomètres destinés à la mesure des basses températures. Paris, Gauthier-Villars et fils, 1893; br. in-8°.

Casalonga (D.-A.) et **Faure (C.-A.).** — Électro-métropolitain parisien pour le transport en commun agréable, facile, économique des voyageurs parisiens dans Paris. — Avant-projet d'exécution et d'exploitation. Paris, *Chronique industrielle*, 1894; br. in-8°.

Caspari (E.). — Les chronomètres de marine (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Charpentier (Augustin). — La lumière et les couleurs au point de vue physiologique. Paris, J.-B. Baillière et fils, 1888; 1 vol. in-8°.

— Recherches sur la persistance des impressions rétiniennes et sur les excitations lumineuses de courte durée. Paris, G. Steinheil, 1890; br. in-8.

Chwolson (O.). — Ueber das Zurückbleiben des Stark gedämpften Magneten bei variabler Strömstärke (Extr. *Ann. der Phys. und Chemie*, Band LI, 1894); br. in-8°.

— Neues Actinometer (Extr. *Ann. der Phys. und Chemie*, Band LI, 1894); br. in-8°.

— Zwei Wärmeleitungsprobleme (Extr. *Ann. der Phys. und Chemie*, Band LI, 1894); br. in-8°.

Colson (R.). — La perspective en Photographie. Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. in-18 jésus.

Congrès des Sociétés savantes. — — Discours prononcés à la Séance générale le samedi 31 mars 1894, par M. Levasseur et par M. Spuller. Paris, Imprimerie nationale, 1894; in-8°.

Congrès international d'électricité de Chicago (1893). — Symbols for physical quantities and abbreviations for units. Recommended by the Committee on notation of the Delegates of the international electrical Congress of 1893. With the names added in italics of the pratical magnetic units provisionally adopted by American Institute of electrical Engineers (Tableau).

Colnet d'Huart (Frantz de). — Les équations de Maxwell étendues à la dispersion. — Effets de la dispersion magnétique sur l'induction électromagnétique. Luxembourg, Ch. Praum Valentini, 1894; br. in-4°.

Drouin (F.). — Le Stéréoscope et la Photographie stéréoscopique. Paris, Ch. Mendel, 1894; 1 vol. in-18.

— La Ferrotypie et l'obtention directe des positifs à la chambre noire. 2ᵉ édition, Paris, Ch. Mendel, 1894; petit in-8°.

Durville (H.). — Traité expérimental de Magnétisme. — Cours professé à l'École pratique de Magnétisme et de Massage. Paris, 1895; 1 vol. petit in-8°.

Dvořák (V.). — Schulversuche aus der Wärmelehre (Extr. *Zeitschrift für den physik. und chemis. Unterricht*, Februar 1894); br. in-4°.

— Bemerkungen zur Theorie der atmosphärischen Electricität (Extr. *Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht*, April 1894); br. in-4°.

Dwelshauvers-Dery. — Étude expérimentale dynamique de la machine à vapeur (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Faure (C.-A.) et **Casalonga (D.-A.).** — Électro-métropolitain parisien pour le transport en commun agréable, facile, économique des voyageurs parisiens dans Paris. — Avant-projet d'exécution et d'exploitation. Paris, *Chronique industrielle*, 1894; br. in-8°.

Fermat. — Œuvres de Fermat publiées par les soins de MM. Paul Tannery et Charles Henry, sous les auspices du Ministère de l'Instruction publique. T. II, Correspondance. Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. in-8°.

Guilloz (Th.). — La photographie instantanée du fond de l'œil humain (Extr. des *Archives d'Ophtalmologie*, 1893); br. in-8°.

Heen (P. de). — Détermination du volume des liquides et des gaz au-dessous de la température critique (Extr. *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3e série, t. XXVII, 1894); br. in-8°.

— Déterminations de l'influence de la pression sur la chaleur spécifique prise en deçà et au delà de la température critique (Extr. *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3e série, t. XXVII, 1894); in-8°.

— Étude comparative des isothermes observées par M. Amagat, et des isothermes calculées par la formule de M. Van der Waals (Extr. *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3e série, t. XXVIII, 1894); br. in-8°.

— Démonstration expérimentale du caractère purement accidentel de l'état critique (Extr. *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, t. XXVII, 1894); br. in-8°.

— Note sur les états liquides et gazeux (Extr. *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3e série, t. XXVII, 1894); br. in-8°.

Hennebert. — Torpilles sèches (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils et G. Masson, 1894; 1 vol. petit in-8°.

— Fortifications (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Hugo (Cte Léopold). — Sur la figure théorique de certains corps simples formant série (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, juin 1884); br. in-4°.

Institut de France. — Académie des Sciences. — Discours prononcés aux funérailles de M. Mallard, par MM. Daubrée et Haton de la Goupillière, 1894; br. in-4°.

Jaumann (G.). — Zur Kenntnits des Ablaufes der Lichtemission (Ext. *Akad. der Wissenschaften in Wien*, Band CIII, 1894; br. in-8°.

Joubin (P.). — Loi de l'aimantation du fer doux (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1893); br. in-4°.

Klossowsky (A.). — Distribution annuelle des orages à la surface du globe terrestre; br. in-8°.

— Organisation de l'étude climatérique spéciale de la Russie et problèmes de la Météorologie agricole. Odessa, N. Chryssoghelos, 1894; br. in-4°.

Laboratoire central d'Électricité. — Règlement et tarif des essais et étalonnements. Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; br. in-8°.

Le Chatelier (Henri). — Sur la fusibilité des mélanges isomorphes de quelques carbonates doubles (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1894); br. in-4°.

— Les Principes fondamentaux de l'Énergétique et leur application aux phénomènes chimiques (Ext. du *Journal de Physique*, 3e série, t. III, 1894); br. in-8°.

Leduc (Stéphane). — La Science de l'Énergie et la Médecine (Ext. de la *Gazette Médicale de Nantes*). Nantes, 1894; br. in-8°.

Lethuillier et Pinel. — Appareils de sûreté pour chaudières à vapeur. Catalogue. Rouen, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Luggin (H.). — Eine einfache Methode zur Vergleichung magnetischer Felder (Ext. *Rep. der Physik*); br. in-8°.

— Ueber das Potential der Metalle bei sehr Kurz dauern der Berührung mit Elektrolyten (Extr. *Akad. der Wissenschaften in Wien;* Band CII, 1893); br. in-8°.

— Ueber die Art der Elektricitätsleitung im Lichtbogen (Extr. *Rep. der Physik*, Band XXVI); br. in-8°.

— Versuche und Bemerkungen über den galvanischen Lichtbogen (Ext. *Rep. der Physik*); br. in-8°.

Lussana (Silvio). — Sul calore specifico dei gas (Ext. *Nuovo Cimento*, 3e série, vol. XXXVI, 1894); br. in-8°.

— A proposito della Nota del Sig. Deguisine « Ueber die Frage nach einer Anomalie des Leitvermögens Wässeriger Losüngen bei 4° » (Ext. *Nuovo Cimento*, 3e série, vol. XXXVI, 1894); br. in-8°.

Macé de Lépinay (J.). — Achromatisme et Chromatisme des franges d'interférence (Ext. du *Journal de Physique*, 3e série, t. III, 1894); br. in-8°.

— Quelques remarques relatives à la théorie du mirage de Biot (Ext. du *Journal de Physique théorique et appliquée*, 3e série, t. II, 1893); br. in-8°.

Mach (Ludwig). — Ueber ein Interferenz-Refractometer (Ext. *Akad. der Wissensch. in Wien*, october 1893); in-8°.

Marchena (R. de). — Machines frigorifiques à gaz liquéfiables (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Maumené (E.-J.). — Extrait d'une étude de l'acide tétraphique (tartrique) et de ses composés salins. Châteauroux, Langlois et Cie, 1894; br. in-8°.

Mendenhall (T.-C.). — Units of electrical Measure (Ext. *United States Coast and geodetic Survey*. Bulletin n° 30, 1894); in-8°.

Meyer (Lothar). — Les théories modernes de la Chimie et leur application à la Mécanique chimique. Ouvrage traduit de l'allemand sur la 5e édition, par *Albert Bloch* et *J. Meunier*. Paris, Georges Carré, 1887-1889; 2 vol. in-8°.

Michelson (Albert-A.). — Détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueurs d'ondes lumineuses. Mémoire traduit de l'anglais par M. J.-René Benoît (Ext. du Tome XI des *Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. in-4°.

Minel (P.). — Électricité appliquée à la Marine. Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

— Régularisation des moteurs de machines électriques (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Neumann (Robert). — Periodische Blätter fur naturkimdlichen und mathematischen Schuluncerricht. Heft I, 1894; br. in-8°.

Nicati (W.). – Échelles visuelles et leurs applications. Paris, Société d'Éditions scientifiques, 1894; 1 vol. in-4° avec Planches.

Paulsen (Adam). — Sur la nature et l'origine de l'aurore boréale (Ext. *Bull. de l'Acad. Roy. des Sciences et des Lettres de Danemark,* pour l'année 1894). Copenhague, br. in-8°.

— Communications de l'observatoire magnétique de Copenhague, année 1892; 1 vol. in-8°.

Pellat (H.). — Variation de la tension superficielle avec la température (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1894); br. in-4°.

Pinel et Lethuillier. — Appareils de sûreté pour chaudières à vapeur. Catalogue. Rouen, 1894; 1 vol. petit in-12.

Preston. — Determination of the constant of aberration from a discussion of the results of observations for the variation of latitude at Waikiki, near Honolulu. Hawaiican Islands. (Extr. *United States Coast and geodetic Survey.* Bulletin n° 28, 1893); br. in-8°.

Rayleigh (John-William-Strutt, baron), Sc. R. F. R. S. honorary Fellow of Trinity College, Cambridge. — The theory of Sound, in two volume, Volume I. Second edition, revised and enlarged. London, Macmillan and C°, and New-York, 1894; 1 vol. in-8°.

Raymond (G.). — Recherches pratiques sur la Photographie des nuages. Versailles, Aubert, 1894; br. in-8°.

Rivière (Ch.) et Brisse (Ch.). — Cours de Physique à l'usage des élèves de la classe de Mathématiques spéciales, par Ch. Brisse et Ch. André, 3° édition. Paris, Delagrave, 1894; 1 vol. in-8°.

Sandoz (Albert). — Banc d'optique pour l'étude de la vision. Paris, Pellin, 1894; br. in-8°.

Schiller (N.). — Ueber die von der Variation electrostatischer Energie abgeleiten electrischen ponderomotorischen Kräfte (Extr. *Ann. der Phys. und Chemie,* Band LIII, 1894); br. in-8°.

Steinheil (Adolph) und Voit (Ernst). — Handbuch der angewandten Optik. I Band : Voraussetzung für die Berechnung optischer Systeme und Anwendung auf einfache und achromatische Linsen. Leipzig, B.-G. Teubner, 1891; 1 vol. in-8°.

Sorel (E.). — Rectification de l'alcool (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Trouvé (G.). — Un nouveau système de pêche. Paris, imprimerie de l'*Armorial français,* 1894; br. in-8°.

Van Aubel (Edm.). — Sur la résistanee électrique du bismuth comprimé (Extr. du *Journal de Physique théorique et appliquée,* 3e série t. II, 1893); br. in-8°.

Van der Mensbrugghe. — Sur la cause commune de la tension superficielle et de l'évaporation des liquides (Extr. *Annales de la Société scientifique de Bruxelles,* t. XVIII, 1894); br. in-8°.

— Sur les pressions exercées par les liquides en mouvement ou en repos (Extr. des *Annales de la Société scientifique de Bruxelles,* t. XVIII, 1892); br. in-8°.

— Démonstration très simple de la cause commune de la tension superficielle et de l'évaporation des liquides (Extr. *Annales de la Société scientifique de Bruxelles,* t. XVIII, 1894); br. in-8°.

Witz (Aimé). — Les machines thermiques (*Encyclopédie des Aide-Mémoire*). Paris, Gauthier-Villars et fils, 1894; 1 vol. petit in-8°.

Young (Tomas). — Œuvres ophtalmologiques, traduites et annotées par M. Tscherning. Copenhague, And. Fred. Höst and son, 1894; 1 vol. in-8°.

Voit (Ernst) und Steinheil (Adolph). — Handbuch der angewandten Optik. I Band : Voraussetzung für die Berechnung optischer Systeme und Anwendung auf einfache und achromatische Linsen. Leipsig, B.-C. Teubner, 1891; 1 vol. in-8°.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE.

LISTE DES MEMBRES.

ANNÉE 1895.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE,

44, RUE DE RENNES, 44.

(1895).

BUREAU.

MM. CAILLETET, *Président.*
BOUTY, *Vice-Président.*
PELLAT, *Secrétaire général.*
POINCARÉ (L.), *Secrétaire.*
CARVALLO, *Vice-Secrétaire.*
GAY (J.), *Archiviste-Trésorier.*

CONSEIL.

Membres résidants :

MM. BECQUEREL. 1893.
CANCE.
VASCHY.
WYROUBOFF.

BLONDEL. 1894.
COLARDEAU.
FRON.
HILLAIRET.

BOUDRÉAUX. 1895.
CURIE (P.).
MASSIEU.
POINCARÉ (A.).

Membres non résidants :

MM. ANDRÉ (Lyon). 1893.
GUÉBHARD (Nice).
GUYE (Ph.-A.) (Genève).
PILTSCHIKOFF (Kharkoff).

LOUGUININE (Moscou). 1894.
MICHELSON (A.) (Chicago).
PÉROT (Marseille).
PIONCHON (Bordeaux).

DUHEM (Bordeaux). 1895.
MESLIN (Montpellier).
MONTEFIORE (Levi) (Bruxelles).
WIEDEMANN (E.) (Erlangen).

ANCIENS PRÉSIDENTS.

1873.	MM.	FIZEAU.
1874.		BERTIN.
1875.		JAMIN.
1876.		QUET.
1877.		BECQUEREL (Ed.).
1878.		BLAVIER.
1879.		BERTHELOT.
1880.		MASCART.
1881.		CORNU.
1882.		GERNEZ.
1883.		JANSSEN.
1884.		POTIER.
1885.		MAREY.
1886.		SEBERT.
1887.		WOLF.
1888.		ROMILLY (de).
1889.		MASCART.
1890.		MALLARD.
1891.		FRIEDEL.
1892.		VIOLLE.
1893.		LIPPMANN.
1894.		JOUBERT.

MM. ALMEIDA (d'), *Secrétaire général, Fondateur* (1873-1880).
JOUBERT, *Secrétaire général honoraire* (1880-1890).
NIAUDET, *Trésorier-Archiviste honoraire* (1875-1882).
MAURAT, *Trésorier-Archiviste honoraire* (1883-1890).

MEMBRES HONORAIRES ([1]).

MM. **FIZEAU** (**A.-H.-L.**), Membre de l'Institut.
STOKES (**G.-G.**), Professeur à l'Université de Cambridge (Angleterre).
KELVIN (**W. Thomson, Lord**), F. R. S., Professeur à l'Université de Glasgow (Écosse).
BELL (**Alex. Graham**), de Washington (États-Unis).
BERTHELOT (**M.**), Sénateur, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.
JANSSEN (**J.**), Membre de l'Institut.
BERTRAND (**J.**), Membre de l'Académie Française, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.
ROWLAND, Professeur à l'Université Johns Hopkins, à Baltimore (États-Unis).
CORNU (**M.-A.**), Membre de l'Institut.
MASCART (**E.-E.-N.**), Membre de l'Institut.

DONATEURS ([2]).

COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DU MIDI (**Baron d'EICHTHAL**)	2000 fr
COMPAGNIE DES SALINS DU MIDI	1000

([1]) *Membres honoraires décédés :*

MM. A. Becquerel.	1871-78.
V. Regnault.	1876-78.
Secchi.	1876-78.
Billet.	1876-82.
Plateau.	1880-83.
Jamin.	1882-86.
Edlund.	1884-88.
Broch.	1878-89.
Joule.	1878-89.
Hirn.	1890-90.
Ed. Becquerel.	1882-91.

Extrait des Statuts, Art. IV. — Le titre de Membre honoraire est conféré comme un hommage et une distinction particulière à des physiciens éminents de la France et de l'étranger.

Les Membres honoraires ont voix délibérative dans les séances de la Société et du Conseil. Ils sont nommés par la Société à la majorité des voix, sur la présentation du Conseil.

Il ne peut en être nommé plus de deux chaque année.

Leur nombre est de dix au plus.

([2]) Les noms des personnes qui auront donné à la Société une somme supérieure

MM. **ANONYME** (pour aider à la publication des Mémoires)..... 5000fr
GUEBHARD, agrégé à la Faculté de Médecine de Paris (pour l'amélioration de la Bibliothèque)........................ 10000
ANONYME (pour aider à la publication du volume des constantes).. 5000
JENNESSON, Principal de Collège (Legs)................ 500
ANONYME (Solde des comptes de la Société chez MM. Gauthier-Villars et fils).................................... 5547,50
BISCHOFFSHEIM, Membre de l'Institut.................. 1500
SAUTTER et **LEMONNIER**, Une machine dynamo.
ANONYME.. 1000
JEUNET, Ancien Professeur au Lycée d'Angoulême.... ... 500

MEMBRES A VIE (1).

MM. D'Abbadie, Membre de l'Institut, 120, rue du Bac.
* Abria, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.
* D'Almeida, Inspecteur général de l'Instruction publique, Secrétaire général de la Société.
Alvergniat, Constructeur d'instruments de physique, 10, rue de la Sorbonne.
Angot, Météorologiste titulaire au Bureau central météorologique, 12, avenue de l'Alma.
Arnoux (René), Ingénieur civil, 16, rue de Berlin.
Arsonval (Dr d'), Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, 28, avenue de l'Observatoire.
Aubert, Professeur au Lycée Condorcet, 139, rue de Rome.
Babinski, Ingénieur civil des Mines, 54, rue Bonaparte.
Baille, Répétiteur à l'École Polytechnique, 26, rue Oberkampf.
Baume Pluvinel (comte de la), 7, rue de la Baume.
Bardy, Directeur du Laboratoire central des Contributions indirectes, 32, rue du Général-Foy.
Bandsept, Ingénieur, 58, chaussée de Wavre, à Bruxelles (Belgique).

---

ou égale à 500fr resteront inscrits, avec le chiffre de la donation, immédiatement après les Membres honoraires, et avant les Membres à vie, sous le titre de Donateurs. Les Membres à vie pourront acquérir ce titre en ajoutant une somme de 300fr à leur souscription perpétuelle. (Décision du Conseil du 1er décembre 1891.)

(1) Les Membres résidants ou non résidants sont libérés de toute cotisation moyennant un versement unique de 200 francs ou quatre versements de 50 francs pendant quatre années consécutives. Les sommes versées pour rachat des cotisations sont placées en valeurs garanties par l'État et leur revenu seul peut être employé aux besoins de la Société. (Statuts, Art. III, dernier paragraphe.)

(*) Membres décédés.

MM. Baron, ancien Directeur à l'Administration des Postes et des Télégraphes, 64, rue Madame.

Benoit (René), Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, au Pavillon de Breteuil, à Sèvres.

Bienaymé, Directeur du matériel au Ministère de la Marine, 74, rue de Rennes.

Bischoffsheim (Raphaël-Louis), Membre de l'Institut, 3, rue Taitbout.

Bjerknes (Wilhelm), chargé de Cours à l'Université de Stockholm (Suède).

* Blavier, Inspecteur général des Télégraphes, Directeur de l'École supérieure de Télégraphie.

Blondel, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, 2, boulevard Raspail.

Blondin, Professeur au Lycée, villa Bombarde, à Orléans.

Blondlot, Correspondant de l'Institut, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 8, quai Claude-le-Lorrain, à Nancy.

Boitel, Professeur au Lycée Lakanal, 9, route de l'Hay, à Bourg-la-Reine.

Bordet (Lucien), ancien Inspecteur des Finances, ancien élève de l'École Polytechnique, Administrateur de la Cie des forges de Châtillon et de Commentry, 181, boulevard Saint-Germain.

Bourgeois (Léon), Répétiteur à l'École Polytechnique, 1, rue du Cardinal-Lemoine.

Bouty, Professeur à la Faculté des Sciences, 9, rue du Val-de-Grâce.

Branly, Professeur à l'École libre des Hautes Études scientifiques et littéraires, 21, avenue de Tourville.

* Bréguet (Antoine), ancien élève de l'École Polytechnique.

Brewer, Constructeur d'instruments pour les Sciences, 76, boulevard Saint-Germain.

Brillouin, Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, 35, rue de l'Arbalète.

* Brion, Professeur de Physique.

Brisse (Ch.), Répétiteur à l'École Polytechnique, 18, rue Vauquelin.

Broca (Dr André), ancien élève de l'École Polytechnique, Préparateur de Physique à la Faculté de Médecine, 7, cité Vaneau.

Brunhes (Bernard), Professeur à la Faculté des Sciences de Dijon.

* Buchin, Ingénieur électricien.

* Cabanellas, Ingénieur électricien.

Cadot, Professeur au Lycée de Douai.

Cailho, Ingénieur des Télégraphes, 21, rue Bertrand.

Canet, Directeur de l'Artillerie des forges et chantiers de la Méditerranée, 3, rue Vignon.

Carpentier, ancien élève de l'École Polytechnique, constructeur d'instruments de Physique, 34, rue du Luxembourg.

MM. Carvallo, Examinateur d'admission à l'École Polytechnique, 1, rue de Courty.

Caspari, Ingénieur hydrographe de la Marine, 30, rue Gay-Lussac.

Cauro (Joseph), ancien Élève de l'École Polytechnique, 4, rue Sophie-Germain.

Chabaud (Victor), Constructeur d'instruments de Physique, 12, rue de la Sorbonne.

Chancel (Félix), Ingénieur des Arts et Manufactures, 34, rue Saint-Jacques, à Marseille.

Chautard, Doyen honoraire de la Faculté libre des Sciences de Lille, au château de la Chapelle, par Croissanville (Calvados).

Chaves (Antonio Ribeiro), 116, rua do Ouvidor, à Rio de Janeiro (Brésil).

* Chervet, Professeur au Lycée Saint-Louis.

Claverie, Censeur du Lycée Condorcet.

Colardeau (Emmanuel), Professeur au Collège Rollin, 29, avenue Trudaine.

Compagnie des Chemins de fer du Midi, 54, boulevard Haussmann.

Compagnie des Salins du Midi, 84, rue de la Victoire.

Contal, Préparateur de Physique au Collège Rollin, 12, avenue Trudaine.

Coppet (de), 41, villa Irène, à Nice.

Cornu, Membre de l'Institut, 9, rue de Grenelle.

Culmann, Docteur ès Sciences, Professeur au Lycée, 24, Schlotzhosfstrass, à Winterthur (Suisse).

Curie (Pierre), Docteur ès Sciences, Chef des travaux de Physique à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, 13, rue des Sablons, à Sceaux.

Dambier, Professeur au Collège Stanislas.

Defforges (le Commandant G.), détaché à l'État-Major général du Ministère de la Guerre, 41, boulevard de La Tour-Maubourg.

Delebecque, Ingénieur des Ponts et Chaussées, à Thonon.

Dollfus (Eugène), Chimiste, fabricant d'indiennes, 1, rue Schlumberger, à Mulhouse (Alsace).

Drouin (Félix), 5, rue Descombes.

* Duboscq (Jules), Constructeur d'instruments de Physique.

Duclaux, Membre de l'Institut, Professeur à l'Institut agronomique, 35 *ter*, rue de Fleurus.

Duclos, ancien Directeur d'École normale à Cérisols, par Sainte-Croix de Volvestre (Ariège).

Dufet, Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, Professeur au Lycée Saint-Louis, 35, rue de l'Arbalète.

Dumoulin-Froment, Constructeur d'instruments de précision, 85, rue Notre-Dame-des-Champs.

Dybowski, Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 16, rue Rottembourg.

Engel, Professeur à l'École Centrale, 50, rue d'Assas.

MM. Favé, Ingénieur hydrographe, 1, rue de Lille.

Fernet, Inspecteur général de l'Instruction publique, 9, rue de Médicis.

Fontaine (Hippolyte), Ingénieur électricien, 52, rue Saint-Georges.

Foussereau, Secrétaire de la Faculté des Sciences, 56, boulevard de Port-Royal.

Friedel, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 9, rue Michelet.

Galimard, Pharmacien de 1re classe, à Dijon.

Gall (Henry), Directeur de l'usine de produits chimiques, à Villers, par Hermes (Oise).

Gariel (C.-M.), Membre de l'Académie de Médecine, Professeur à la Faculté de Médecine, 6, rue Édouard-Detaille.

Gauthier-Villars, Libraire-Éditeur, 55, quai des Grands-Augustins.

Gay (Jules), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 16, rue Cassette.

Gayon, Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de la station agronomique, 41, rue Permentade, à Bordeaux.

Gernez, Maître de conférences à l'École Normale supérieure, 18, rue Saint-Sulpice.

Godard (Léon), Docteur ès sciences, 82, boulevard Saint-Germain.

Godefroy (l'abbé), Ancien Professeur de Chimie à l'Institut catholique.

Godron (H.), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 9, rue des Grandes-Poteries, à Alençon.

Goloubitzky, Collaborateur de la Société des amis des Sciences de Moscou, à Kalouga Faroussa (Russie).

* Gotendorf (Silvanus).

Gouré de Villemontée, Professeur au Lycée Buffon, 31, rue de Poissy.

Gramont (Arnaud de), Licencié ès Sciences, 81, rue de Lille.

Gray (Robert Kaye), Ingénieur électricien de l'India Rubber, Gutta and telegraph works Co limited, à Londres (Angleterre).

Grosseteste (William), Ingénieur, 11, rue des Tanneurs, à Mulhouse (Alsace).

Grouvelle, Ingénieur, Professeur à l'École Centrale, 18, avenue de l'Observatoire.

Guébhard (Dr Ad.), Agrégé de Physique de la Faculté de Médecine, Villa Mendiguren, à Nice.

* Hugo (Comte Léopold).

Husson (Léon), Contrôleur du câble télégraphique, à Haïphong (Tonkin).

Infreville (Georges d'), Électricien de la *Western Union Telegraph*, Expert de la *National Bell Telephone Co*, 110, Liberty Street, New-York (États-Unis).

* Jamin, Membre de l'Institut.

Janet (Paul), Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble,

Chargé de cours à la Faculté des Sciences de Paris, 180, boulevard Saint-Germain.

MM. Javal, Membre de l'Académie de Médecine, Directeur du laboratoire d'Ophtalmologie à la Sorbonne, 52, rue de Grenelle.

* Jennesson, Ancien Principal.

Jénot, Professeur au Collège Rollin, 17, rue Caulaincourt.

Jeunet, Professeur honoraire, 15, avenue de la Défense de Paris, Puteaux (Seine).

Joly, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 2 *bis*, square du Croisic.

Joubert, Inspecteur général de l'Instruction publique, 67, rue Violet.

Kœchlin (Horace), Chimiste, 16, rue Masséna, à Lyon.

Lacour, Ingénieur civil des Mines, 60, rue Ampère

Laurent (Léon), Constructeur d'instruments d'optique, 21, rue de l'Odéon.

Le Bel, ancien Président de la Société chimique, 25, rue Franklin.

Leblanc, ancien élève de l'École Polytechnique, 63, allée du Jardin Anglais, au Raincy.

Lechat, Professeur honoraire du Lycée Louis-le-Grand, 4, rue de Calais.

Le Chatelier (André), Ingénieur des Constructions navales, 25, cours Gambetta, à Lyon.

Le Chatelier (Henry), Ingénieur des Mines, Professeur de Chimie générale à l'École des Mines, 73, rue Notre-Dame-des-Champs.

Le Chatelier (Louis), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 95, rue de Rennes.

Le Cordier (Paul), chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand.

Leduc, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences. 136, rue d'Assas.

Lefebvre (Pierre), Professeur au Lycée, 34, de Bellaing, à Douai.

Lemoine (E.), ancien élève de l'École Polytechnique, 5, rue Littré.

* Lemonnier, ancien élève de l'École Polytechnique.

Lemström (Selim), Professeur de Physique à l'Université de Helsingfors (Finlande).

Lequeux, Ingénieur des Arts et Manufactures, 64, rue Gay-Lussac.

Leroy, Professeur au Lycée Michelet, 245, boulevard Raspail.

Lespiault, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

* Létang (Paul), Ingénieur électricien.

Limb, Ingénieur, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 104, rue d'Assas.

Lippmann, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 10, rue de l'Éperon.

Lyon (Gustave), ancien élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, 24 *bis*, rue Rochechouart.

Macé de Lépinay, Professeur à la Faculté des Sciences, 105, boulevard Longchamps, à Marseille.

MM. Mach (Dr E.), Professeur de Physique à l'Université de Prague (Autriche).

* Mallard, Membre de l'Institut, Inspecteur général des Mines, Professeur de Minéralogie à l'École des Mines.

Maneuvrier, Agrégé de l'Université, Sous-Directeur du Laboratoire des recherches à la Sorbonne, 54, rue Notre-Dame-des-Champs.

Macquet (Auguste), Ingénieur au corps des Mines, Professeur à l'École des Mines du Hainaut, à Mons (Belgique).

Martin (Ch.), rue de Bonneval, à Chartres.

Mascart, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, 176, rue de l'Université.

Masson (G.), Libraire-Éditeur, 120, boulevard Saint-Germain.

Maurat, Professeur honoraire du Lycée Saint-Louis, à Rochecorbon (Indre-et-Loire).

Menier (Henri), 8, rue de Vigny.

Meslin, Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Montpellier.

* Meyer (Bernard), Ingénieur des Télégraphes.

Molteni, Ingénieur-Constructeur, 44, rue du Château-d'Eau.

* Moncel (comte du), Membre de l'Institut.

Montefiore (Lévi), Sénateur, Ingénieur, Fondateur de l'Institut électrotechnique, à Liège.

Moser (Dr James), Privat-Docent à l'Université, viii, Laudongasse, 25, à Vienne (Autriche).

Muirhead (Dr Alexandre F. C. S.), 3, Elm Court, Temple E. C. Londres.

Nerville (de), Ingénieur des Télégraphes, 116, boulevard Haussmann

Nogué (Émile), Attaché à la maison Pellin-Duboscq, 138, rue d'Assas.

* Niaudet, Ingénieur civil.

Ogier (Jules), Docteur ès Sciences, Chef du laboratoire de Toxicologie, 1, quai d'Orsay.

Ollivier (A.), Ingénieur civil, 51, boulevard Beaumarchais.

Palmade, Professeur au Lycée de Nîmes.

Palmade, Capitaine du Génie, au fort Saint-Sauveur, à Lille.

Pavlidès (Démosthènes), Docteur en Médecine, 14, rue Cadet.

Pellat, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 3, avenue de l'Observatoire.

Pérard (L.), Professeur à l'Université, 101, rue Saint-Esprit, Liège (Belgique).

* Pérot, Dessinateur et Graveur.

Pérot (Alfred), Professeur d'Électricité industrielle à la Faculté des Sciences, 119, boulevard Longchamps, à Marseille.

Perreau, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Nancy.

Picou, Ingénieur des Arts et Manufactures, 75, avenue de la Grande-Armée.

Piltschikoff (Nicolas), Professeur à l'Université de Kharkoff (Russie).

MM. Poincaré (A.), Inspecteur général des Ponts et Chaussées, 14, rue du Regard.

Poincaré (Lucien), Professeur à l'École normale supérieure de Sèvres, 17, rue d'Assas.

Pollard (Jules), Ingénieur de la Marine, 8, rue Bassano.

Popp (Victor), Administrateur-Directeur de la Compagnie des horloges pneumatiques, 54, rue Étienne-Marcel.

Potier, Membre de l'Institut, Ingénieur en chef des Mines, 89, boulevard Saint-Michel.

Poussin (Alexandre), Ingénieur, au château de La Houblonnière, par Lisieux.

Pupin, Secrétaire de la Faculté de Médecine de Paris.

Puyfontaine (Comte de), 34, avenue Friedland.

Raffard (N.-J.), Ingénieur, 5, avenue d'Orléans.

Raymond, Ingénieur des Constructions navales, à Toulon.

* Raynaud, Directeur de l'École supérieure de Télégraphie.

Renault, Licencié ès Sciences physiques, 25, rue Brézin.

Ribière (Charles), Ingénieur des ponts et chaussées attaché au service des phares, 6, rue Bizet.

* Rigout (A.), Docteur en Médecine.

Rivière, Professeur au Lycée Saint-Louis, 17, rue Gay-Lussac.

Rodde (Ferd.), 3, cité Magenta.

Rodde (Léon), rua do Ouvidor, 107, à Rio de Janeiro (Brésil).

Rodocanachi (Emmanuel), 54, rue de Lisbonne.

Roger, Chef d'institution honoraire, 7, rue Faustin-Hélie.

Romilly (Félix de), 25, avenue Montaigne.

Romilly (Paul de), Ingénieur en Chef des Mines, 7, rue Balzac.

Rozier (F.), Docteur en Médecine, 19, rue du Petit-Pont.

Sainte-Claire Deville (Emile), Ingénieur à la Compagnie du gaz, 9, rue Brémontier.

* Sainte-Claire Deville (Henri), Membre de l'Institut.

* Salet, Maître de conférences à la Faculté des Sciences.

Schwedoff, Professeur à l'Université d'Odessa (Russie).

Sebert, Général d'Artillerie de Marine, Administrateur des forges et chantiers de la Méditerranée, 14, rue Brémontier.

Seligmann-Lui, Sous-Inspecteur des Télégraphes, 103, rue de Grenelle.

Serpollet, Ingénieur, 27, rue des Cloys.

* Spottiswoode (W.), Président de la Société royale de Londres.

Strauss, Chef du Génie, 16, boulevard de la Liberté, à Gap.

Street (Charles), Ingénieur des Arts et Manufactures, 39, rue Joubert.

Teploff, Colonel du Génie impérial russe, rue Vladimirskaïa, 15, Maison Friederichs, Saint-Pétersbourg.

Termier, Ingénieur des Mines, Professeur à l'École Nationale des Mines, 71, rue Claude-Bernard.

* Terquem, Professeur à la Faculté des Sciences, à Lille.

MM. * Thollon, Physicien à l'Observatoire de Nice.

Thomas, Professeur à l'École supérieure des Sciences d'Alger.

Thouvenel, Professeur au Lycée Charlemagne, 100, rue de Rennes.

Touanne (de la), Ingénieur des Télégraphes, 13, rue Soufflot.

Tuleu, Ingénieur, 58, rue Hauteville.

Vagniez (Édouard), à Amiens.

* Van den Kerchove, Sénateur, Gand (Belgique).

Vaschy, Ingénieur des Télégraphes, Répétiteur à l'École Polytechnique, 68, avenue Bosquet.

Vautier (Théodore), Professeur adjoint de Physique à la Faculté des Sciences, 30, quai Saint-Antoine, à Lyon.

Verrier (J.-F.-G.), Membre de plusieurs Sociétés savantes, 13, boulevard Saint-Germain.

Villiers (Antoine), Agrégé à l'École de Pharmacie, 30, avenue de l'Observatoire.

Violle, Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, 89, boulevard Saint-Michel.

Wallon (E.), Professeur au Lycée Janson de Sailly, 24, rue de Saint-Pétersbourg.

* Warren de la Rue, Correspondant de l'Institut.

Weiss (Dr Georges), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur agrégé de Physique à la Faculté de Médecine, 119, boulevard Saint-Germain.

Weyher, Ingénieur, Administrateur-Directeur de la Société centrale de Construction de machines, 36, rue Ampère.

Wunschendorff, Ingénieur des Télégraphes, 92, rue de Rennes.

Wyrouboff, Docteur ès Sciences, 141, rue de Rennes.

Amagat, Correspondant de l'Institut, Répétiteur à l'École Polytechnique, 34, rue Saint-Lambert.

Bertin, Directeur de l'École d'Application du Génie maritime, 140, boulevard Montparnasse.

Carimey, Professeur au Lycée Saint-Louis.

* Chabry (Dr L.), Docteur ès Sciences.

Chauveau, ancien élève de l'École Normale supérieure, Météorologiste adjoint au Bureau central, 51, rue de Lille.

Faivre-Dupaigre, Professeur au Lycée Saint-Louis, 95, boulevard Saint-Michel.

Foveau de Courmelle (Dr), 26, rue Le Peletier.

* Gaudin, ancien élève de l'École Polytechnique.

Gérard (Anatole), Ingénieur électricien, 16, rue des Grandes-Carrières.

Javaux (Émile), Directeur de la Société des *Ateliers Gramme*, 33, rue Clavel.

Jobin, ancien élève de l'École Polytechnique, 21, rue de l'Odéon.

MM. KERANGUÉ (Yves DE), Capitaine en retraite, à Kernouël, près Paimpol (Côtes-du-Nord).

KNOLL, Préparateur de Physique au Lycée Louis-le-Grand.

KROUCHKOLL, Docteur ès Sciences et Docteur en médecine, Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences, 6, rue Édouard-Detaille.

LAPRESTÉ, Professeur au Lycée Buffon, 7, rue Charlet.

LAVIÉVILLE, Professeur au Lycée Condorcet, 56, rue de Lisbonne.

MAURIN (Charles), Agrégé, préparateur au Collège de France.

MESTRE, Ingénieur à la Cie des Chemins de fer de l'Est, 168, rue Lafayette.

LISTE DES MEMBRES DE LA SOCIÉTÉ.

MM.

ABBADIE (d'), Membre de l'Institut, 120, rue du Bac.

ABRAHAM, Professeur au Lycée Louis-le-Grand.

ADAM (Étienne), Professeur au Lycée de Bar-le-Duc.

AGUILAR Y SANTILLAN (Raphael), Préparateur de Physique à l'École Normale de Mexico (Mexique).

ALBERT (Fernand), Professeur au Collège de Pontoise, 4, rue de la Terrasse, à Créteil.

ALLUARD, Professeur honoraire à la Faculté des Sciences, 22 *bis*, place de Jaude, Clermont-Ferrand.

ALVERGNIAT, Constr. d'instruments de Physique, 10, rue de la Sorbonne.

AMAGAT, Correspondant de l'Institut, Répétiteur à l'École Polytechnique, 34, rue Saint-Lambert.

AMET (E.), aux usines Saint-Hubert, à Sézanne (Marne).

ANDRÉ (Ch.), Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de l'Observatoire de Lyon.

ANGOT, Météorologiste titulaire au Bureau central météorologique, 12, avenue de l'Alma.

ANTHONISSEN (Joseph), 21, rue Hauteville.

APPERT (Louis), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur verrier, 50, rue de Londres.

ARGYROPOULOS, Professeur de Physique, à Athènes (Grèce).

ARMAGNAT, Ingénieur, 20, rue Delambre.

ARNOUX (René), Ingénieur civil, 16, rue de Berlin.

ARNOYE (Léon), Professeur au Lycée, 40, rue Gasseras, à Montauban.

ARSONVAL (D^r d'), Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, 28, avenue de l'Observatoire.

ARTH, Chargé d'un Cours de Chimie industrielle à la Faculté des Sciences de Nancy.

ARTHAUD, Chef des travaux histologiques au Laboratoire de Physiologie générale du Muséum, 6, rue Berthollet.

ATTAINVILLE (d'), Docteur en Médecine, 7, rue Brunel.

AUBERT, Professeur au Lycée Condorcet, 139, rue de Rome.

AUBRY, Professeur au Lycée de Foix.

AUDIBERT, Professeur au Collège de Béziers.

AUPAIX, Professeur au Lycée, 16, place Terre-au-Duc, à Quimper.

AYLMER (John), Ingénieur, 4, rue de Naples.

AYMONNET (J.-F.), Professeur de Physique, 54, boulevard Arago.

BABINSKI, Ingénieur civil des Mines, 54, rue Bonaparte.

BABLON, 42, rue Boulard.

MM.

BAGARD, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Dijon.

BAILLAUD (B.), Doyen honoraire de la Faculté des Sciences, Directeur de l'Observatoire de Toulouse.

BAILLE, Répétiteur à l'École Polytechnique, 26, rue Oberkampf.

BAILLY, Professeur au Lycée de Pau.

BANDSEPT, Ingénieur, 58, chaussée de Wavre, à Bruxelles (Belgique).

BANET-RIVET, Professeur au Lycée Saint-Louis, 19 *bis*, boulevard de Port-Royal.

BARBIER (Paul), Ingénieur, 129, avenue de Villiers.

BARDEL, Libraire, à Évreux.

BARDY, Directeur du laboratoire central de l'Administration des Contributions indirectes, 32, rue du Général-Foy.

BARON, Directeur à l'Administration des Postes et Télégraphes, 64, rue Madame.

BARRAUD (Ph.), Docteur en Médecine, 50, rue Saint-Placide.

BARY (Paul), Ingénieur électricien, 5, rue Gay-Lussac.

BASSÉE (Jules-Charles), Constructeur d'instruments de Physique, 92, rue de Bondy.

BASSET, Professeur au Lycée de Bourges.

BASSOT, Membre de l'Institut, Lieutenant-Colonel du Génie, Chef de la Section de Géodésie au Service géographique de l'armée, 16, rue Saint-Dominique.

BASTIDE, Employé au Secrétariat de la Faculté des Sciences de Paris.

BATTELLI (Angelo), Professeur à l'Université de Pise (Italie).

BAUDOT, Inspecteur-Ingénieur des lignes télégraphiques, 6, rue Mayet.

BAUME PLUVINEL (Comte Aymar de la), 7, rue de La Baume.

BEAULARD (Fernand), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 4, rue du Docteur-Bailly, à Grenoble.

BÉCORDEL (H. de), Receveur principal, à Grasse.

BECQUEREL (Henri), Membre de l'Institut, Professeur à l'École Polytechnique, 21, boulevard Saint-Germain.

BÉDART, Professeur agrégé de Physiologie à la Faculté de Médecine de Lille.

BÉDOREZ, Proviseur du Lycée de Nancy.

BEGHIN (Auguste), Professeur à l'École nationale des Arts industriels, 50, rue du Tilleul, à Roubaix.

BEL (Edgar), Professeur au Lycée d'Oran (Algérie).

BELL (Alexander Graham), 95, Scott Circle, Washington D. C. (U. S. A).

BELLE (Gaston), Ministre plénipotentiaire, 15, avenue Kléber.

BELLATI (Manfredo), Professeur de Physique technique à l'École des Ingénieurs, à l'Université de Pise (Italie).

BENAVIDES (Francisco da Fonseca), Professeur à l'Institut industriel de Lisbonne (Portugal).

BENOIST, Professeur au Lycée Henri IV, 62, rue Monge.

BENOIT (René), Docteur ès sciences, Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, au pavillon de Breteuil, Sèvres.

MM.

BERGER (**Georges**), Député, 8, rue Legendre.

BERGERON (**J.**), Docteur ès sciences, Sous-Directeur du Laboratoire de Géologie à la Faculté des Sciences, 157, boulevard Haussmann.

BERGET (**Alphonse**), Docteur ès sciences, attaché au laboratoire des recherches physiques à la Sorbonne, 16, rue de Vaugirard.

BERGON, Ancien Directeur au Ministère des Postes et des Télégraphes, 56, rue Madame.

BERGONIÉ (Dr), Professeur de Physique à la Faculté de Médecine, 6 *bis*, rue du Temple, à Bordeaux.

BERNARD (**Alfred**), Professeur au Lycée de Périgueux.

BERNARD, Préparateur de Physique, au Lycée de Bastia.

BERNARD, Professeur au Collège de Melun.

BERSON, Professeur à la Faculté des Sciences, 3, avenue Frisac, à Toulouse.

BERTHELOT, Sénateur, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, 3, rue Mazarine.

BERTHELOT (**Daniel**), Docteur ès sciences, Préparateur à la Faculté des Sciences, 3, rue Mazarine.

BERTIN, Directeur de l'École d'Application du Génie maritime, 140, boulevard Montparnasse.

BERTIN, Professeur à l'École normale de la Grande Sauve (Gironde).

BERTIN-SANS (Dr **Henri**), Chef des Travaux pratiques de Physique à la Faculté de Médecine, 8, rue de la Merci, à Montpellier.

BERTRAND (**J.**), Membre de l'Académie Française, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, 4, rue de Tournon.

BERTRAND (**A.-L.**), Chef de Bataillon du Génie, attaché à la Section technique du Génie au Ministère de la Guerre, 8, rue Saint-Dominique.

BESANÇON (**M.-J.**), Professeur à l'École Turgot et à l'École supérieure du Commerce.

BESOMBES (**Noël**), Inspecteur des Postes et Télégraphes, 2, place Saint-Michel, à Marseille.

BESSON (**Léon**), Ancien Officier de Marine, Sous-Chef de l'Exploitation à la Compagnie générale Transatlantique, 6, rue Aubert.

BEZODIS, Professeur honoraire de l'Université, 9, avenue Marceau.

BIBLIOTHÈQUE DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES.

BIBLIOTHÈQUE DES FACULTÉS, à Caen.

BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE DE LILLE.

BIBLIOTHÈQUE ROYALE DE BERLIN.

BICHAT, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 1 *bis*, rue des Jardiniers, à Nancy.

BIDAUX (**Maurice**), Pharmacien de 1re classe, à Chaville.

BIENAYMÉ, Inspecteur général du Génie maritime, 74, rue de Rennes.

BISCHOFFSHEIM (**Raphaël-Louis**), Membre de l'Institut, 3, rue Taitbout.

BJERKNES (**Vilhelm**), Chargé de Cours à l'Université de Stockholm (Suède).

MM.

BLAREZ (le Dr) Professeur à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, 3, rue Gouvion, à Bordeaux.

BLOCH (**Salvator**), Professeur au Lycée de Versailles, 62, rue du Montparnasse.

BLONAY (**Roger de**), 23, rue La Rochefoucauld.

BLONDEL, Ingénieur des Ponts et Chaussées, 2, boulevard Raspail.

BLONDIN, Professeur au Lycée, villa Bombarde, à Orléans.

BLONDLOT (**R.**), Correspondant de l'Institut, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 8, quai Claude-le-Lorrain, à Nancy.

BOBILEFF, Professeur de Mécanique à l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

BOCAT (**l'abbé**), Licencié ès Sciences Physiques, Professeur au Collège Saint-François-de-Salles, rue Vannerie, à Dijon.

BOISARD (**Louis**), Agrégé des Sciences Physiques, Professeur au Lycée Carnot, 98, rue Demours.

BOITEL, Professeur au Lycée Lakanal, 5, route de l'Hay, à Bourg-la-Reine.

BONAPARTE (**Prince Roland**), 10, avenue d'Iéna.

BONAVITA, Professeur au Lycée de Bastia.

BONETTI (**L.**), Constructeur électricien, 69, avenue d'Orléans.

BONIOL, Professeur de Mathématiques, 108, rue des Ternes.

BORDET (**Lucien**), ancien élève de l'École Polytechnique, ancien Inspecteur des Finances, Administrateur de la Compagnie des forges de Châtillon et de Commentry, 181, boulevard Saint-Germain.

BORDIER (**Dr Henri**), Préparateur de Physique à la Faculté de Médecine de Bordeaux.

BORGMANN, Professeur à l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

BOUANT, Professeur au Lycée Charlemagne.

BOUASSE (**Henri**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Toulouse.

BOUCHER (**Ch.**), Préfet des Études au Collège Chaptal, 45, boulevard des Batignolles.

BOUCHEROT (**Paul**), Ingénieur de la Société des établissements Weyher et Richemond, 20, quai d'Asnières, à Villeneuve-la-Garenne (Seine).

BOUDRET, Professeur au Lycée d'Agen.

BOUDRÉAUX, Conservateur des collections de Physique à l'École Polytechnique, 4, rue Clovis.

BOULANGER (**Julien**), Commandant du Génie, Attaché au Dépôt des fortifications, 23, boulevard du Montparnasse.

BOULOUCH (**R.**), Professeur au Lycée de Bordeaux.

BOURGAREL, Professeur au Lycée de Chambéry.

BOURGEOIS (**Léon**), Répétiteur à l'École Polytechnique, 1, rue du Cardinal-Lemoine.

BOURRUT-DUVIVIER, Professeur à l'École Navale, 19, rue de Siam, à Brest.

BOUSQUET (**E.**), Directeur de l'École normale de Nice.

MM.

BOUTAN, Inspecteur général honoraire de l'Instruction publique, à Miremonde, par Terraube (Gers).

BOUTET DE MONVEL, Professeur honoraire de l'Université, 5, rue des Pyramides.

BOUTY, Professeur à la Faculté des Sciences, 9, rue du Val-de-Grâce.

BOZZOLA (**l'abbé J.-B.**), Professeur au Séminaire de Padoue (Italie).

BRACHET (**Henri**), Ingénieur électricien, 3, quai Fulchiron, à Lyon.

BRANLY (**E.**), Professeur à l'École libre des Hautes Études scientifiques et littéraires, 21, avenue de Tourville.

BREWER (**William J.**), Constructeur d'instruments pour les sciences, 76, boulevard Saint-Germain.

BRIEU (**Georges**), Professeur à l'École Normale, 11, rue Aubarède, à Périgueux.

BRILLOUIN (**Marcel**), Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, 35, rue de l'Arbalète.

BRISAC, Ingénieur de l'éclairage à la Compagnie Parisienne du gaz, 7 *bis*, rue de l'Aqueduc.

BRISSE, Répétiteur à l'École Polytechnique, 18, rue Vauquelin.

BROCA (**Dr André**), ancien élève de l'École Polytechnique, Préparateur de Physique à la Faculté de Médecine, 7, cité Vaneau.

BROUQUIER (**l'abbé**), Directeur du petit Séminaire de Toulouse.

BROWNE (**H.-V.**), Représentant de la compagnie Direct Spanish Telegraph, à Barcelone (Espagne).

BRUNEL, Lieutenant au 5e régiment d'Artillerie, 3, rue des Mousselots, à Besançon.

BRUNHES (**Bernard**), Professeur à la Faculté des Sciences de Dijon.

BRUNNER, Constructeur d'instruments de précision, 13, avenue de l'Observatoire.

BUCQUET (**Maurice**), Président du *Photo-Club de Paris*, 34, rue de Chaillot.

BUDDE (**Dr**), Rédacteur au *Fortschritte*, Klopstock-strasse, 53, à Berlin. N. W.

BUGUET (**Abel**), Professeur au Lycée, 5, rue Bellevue, à Rouen.

BUISSON (**Maxime**), Chimiste, 11, rue de la Chaussée, à Chantilly (Oise).

CADENAT, Professeur au Collège de Saint-Claude.

CADIAT, Ingénieur, 62, rue des Tournelles.

CADOT (**Albert**), Professeur au Lycée de Douai.

CAEL, Directeur-Ingénieur des Télégraphes, 11, Cité Vaneau.

CAILHO, Ingénieur des Télégraphes, 21, rue Bertrand.

CAILLETET (**L.-P.**), Membre de l'Institut, 75, boulevard Saint-Michel.

CAILLOL DE PONCY, Professeur à l'École de Médecine, 8, rue Clapier, à Marseille.

CALMETTE, Professeur au prytanée militaire de la Flèche.

CANCE, Ingénieur électricien, 9, rue de Rocroy.

MM.

CANET (**Gustave-Adolphe**), Directeur de l'Artillerie des Forges et Chantiers de la Méditerranée, 3, rue Vignon.

CARPENTIER, ancien Élève de l'École Polytechnique, constructeur d'instruments de Physique, 34, rue du Luxembourg.

CARRÉ (**F.**), Professeur au Lycée Michelet, à Caen.

CARIMEY, Professeur au Lycée Saint-Louis.

CARVALLO (**E.**), Examinateur d'admission à l'École Polytechnique, 1, rue de Courty.

CASALONGA, Ingénieur civil, 11, rue des Déchargeurs.

CASPARI (**E.**), Ingénieur hydrographe de la Marine, Répétiteur à l'École Polytechnique, 30, rue Gay-Lussac.

CASTEX (**Edmond**), Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Lille.

CAURO (**Joseph**), ancien élève de l'École Polytechnique, 4, rue Sophie-Germain.

CAVAILLÉ-COLL, Facteur d'orgues, 15, avenue du Maine.

CAVIALE (**V.**), Professeur de Physique à l'École Normale, 49, avenue de Saint-Cloud, à Versailles.

CAVAILLÈS, Préparateur de Physique au Lycée de Nice.

CAZES (**Laurent**), Répétiteur général au Lycée Saint-Louis, 36, rue Notre-Dame-des-Champs.

CENSIER (**A.**), Professeur au Lycée de Nîmes.

CHABAUD (**Victor**), Constructeur d'instruments de précision, 12, rue de la Sorbonne.

CHABERT (**Léon**), Ingénieur électricien, 93, rue Jouffroy.

CHABRERIE, Principal du Collège de Treignac (Corrèze).

CHABRIÉ (**Camille**), Docteur ès Sciences, 9, avenue de Saxe.

CHAMAND (**Joseph**), Chef de bataillon au 46e territorial, 9, rue des Jardins-Fleuris, à Pompey (Meurthe-et-Moselle).

CHAMBERT (**Paul**), rue de la Manufacture, à Châteauroux.

CHANAL, Professeur au Lycée de Reims.

CHANCEL (**Félix**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 34, rue Saint-Jacques, à Marseille.

CHAPPUIS (**James**), Professeur à l'École centrale, 5, rue des Beaux-Arts.

CHAPPUIS (**Pierre**), attaché au Bureau international des Poids et Mesures, au Pavillon de Breteuil, à Sèvres.

CHARDONNET (**le comte de**), ancien élève de l'École Polytechnique, 20, place de l'État-Major, à Besançon, et 43, rue Cambon, à Paris.

CHARPENTIER, Professeur à la Faculté de Médecine de Montpellier.

CHARTRAND, Docteur en Médecine, Professeur à l'Université de Montréal (Canada).

CHASSAGNY, Professeur au Lycée Janson de Sailly.

CHASSY, Professeur à la Faculté libre des Sciences, à Lyon.

CHATELAIN (**Michel**), au Laboratoire de l'Université, à St-Pétersbourg (Russie).

MM.

CHAUMAT, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 33, rue Linné.

CHAUSSEGROS, Ingénieur, chef de traction au chemin de fer, 3, place Jussieu.

CHAUTARD, Doyen honoraire de la Faculté libre des Sciences de Lille, à la Villa Saint-Marc, par Croissanville (Calvados).

CHAUVEAU, ancien Élève de l'École Normale Supérieure, Météorologiste adjoint au Bureau Central, 51, rue de Lille.

CHAVES (Antonio Ribeiro), 116, rua do Ouvidor, à Rio de Janeiro (Brésil).

CHENEVIER, Directeur du Laboratoire de la Compagnie des Chemins de fer du Midi, 8, rue Tanesse, à Bordeaux.

CHEVALLIER (Henry), Préparateur à la Faculté des Sciences, 61, rue Clément, à Bordeaux.

CHIBOUT, Ingénieur, Constructeur d'appareils de chauffage, 36, rue Notre-Dame-des-Champs.

CHISTONI (CIRO), Professeur à l'Université de Modène (Italie).

CHUDEAU, Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Besançon.

CHWOLSON (Oreste), Professeur à l'Université Impériale, Wassili Ostrow, 12 signe, Maiven 7, Logement 3, à Saint Pétersbourg (Russie).

CLAVEAU, Professeur au Lycée de Brest.

CLAVERIE, Censeur du Lycée Condorcet, 65, rue Caumartin.

COLARDEAU (P.), Professeur au Lycée de Lille.

COLARDEAU (Emmanuel), Professeur au Collège Rollin, 29, avenue Trudaine.

COLIN (Th.) Professeur au Lycée de Montpellier.

COLLIGNON (Benoît), ancien élève de l'École Polytechnique, Professeur de Mathématiques, 102, rue Jean-Jacques-Rousseau, à Dijon.

COLLOT (Armand), Ingénieur des Arts et Manufactures, Constructeur d'Instruments de précision, 8, boulevard Edgar-Quinet.

COLNET D'HUART (de), Membre de l'Académie Royale de Belgique, ancien Directeur des finances du Grand-Duché de Luxembourg, à Luxembourg.

COLNET D'HUART (François de), Docteur ès sciences, Professeur à l'Athénée, avenue Reinsheim, à Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).

COLSON (R.), Capitaine du Génie, 66, rue de la Pompe.

COMBES (A.), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, ancien élève de l'École Polytechnique, 14, rue du Val-de-Grâce.

COMBES (Charles), Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles, 15, rue Bara.

COMBET (Candide), Professeur au Lycée de Tunis (Tunisie).

COMBETTE, Inspecteur général de l'Instruction publique, 63, rue Claude-Bernard.

COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DU MIDI, 54, boulevard Haussmann.

COMPAGNIE DES SALINS DU MIDI, 84, rue de la Victoire.

CONTAL, Préparateur de Physique au Collège Rollin, 12, avenue Trudaine.

COPPET (de), 41, villa Irène, rue Magnan, à Nice.

CORNU, Membre de l'Institut, Professeur à l'École Polytechnique, 9, rue de Grenelle.

MM.

CORVISY (**A**.), Professeur au Lycée, 75, rue Carnot, à Saint-Omer.

COUETTE (**Maurice**), Docteur ès sciences, Professeur à la Faculté libre des Sciences, 26, rue de La Fontaine, à Angers.

COUPIER, à Saint-Denis-Hors, par Amboise.

COUPIER, Ingénieur des Poudres et Salpêtres, Directeur de la Raffinerie de Saint-Denis, à Marseille.

COURQUIN (**l'abbé**), Professeur de filature à l'École industrielle, 29, rue du Casino, à Tourcoing.

COURTOY, Professeur à l'École vétérinaire, 47, rue Bara, à Bruxelles (Belgique).

CROIX (**Victor**), Professeur au Collège communal, avenue du Clos, à Saint-Amand-les-Eaux (Nord).

CROIZIER, Capitaine d'Artillerie de Marine en retraite, 11, rue Monadey, à Bordeaux.

CROVA, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 14, rue du Carré-du-Roi, Montpellier.

CUÉNOD, Ingénieur électricien, 10, boulevard Voltaire, à Genève (Suisse).

CULMANN (**P**), Docteur ès sciences, Professeur au Lycée, 24, Schlotzhofstrasse, à Winterthur (Suisse).

CURIE (**Pierre**), Dr ès Sciences, Chef des Travaux de Physique à l'École de Physique et de Chimie industrielle de la Ville de Paris, 13, rue des Sablons, à Sceaux.

DAGUENET, Professeur au Lycée, 8, rue Montbauron, à Versailles.

DAMBIER, Professeur en congé à Les Coutets, par Mouleydier (Dordogne).

DAMIEN, Professeur à la Faculté des Sciences, 49, rue Brûle-Maison, à Lille.

DARZENS, Préparateur de Chimie à l'École Polytechnique, 24, rue de la Cerisaie.

DEBRUN (**E.-E.**), Professeur au Collège de Saint-Flour.

DECHEVRENS (**Père Marc S. J.**), ancien Directeur de l'Observatoire de Zi-Ka-Wei (Chine), à Saint-Hélier, Observatoire Saint-Louis (île Jersey).

DEDET (**François**), Professeur honoraire de Physique, à Albi.

DEFFORGES (le Commandant **G**.), détaché à l'État-Major général du Ministère de la Guerre, 41, boulevard de Latour-Maubourg.

DELAUNAY (**Nicolas**), Professeur de Mécanique à l'Institut d'Agriculture à Novo-Alexandria, gouvernement Lublin (Russie).

DELAURIER, Ingénieur, 77, rue Daguerre.

DELEBECQUE, Ingénieur des Ponts et Chaussées, à Thonon.

DELEVEAU, Professeur au Lycée, 39, rue de Lodi, à Marseille.

DELPEUCH, Ingénieur de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est.

DEMERLIAC, Professeur au Lycée de Caen.

DELVALEZ, Professeur au Lycée de Poitiers.

DE METZ, Professeur à l'Université Saint-Wladimir, 3, rue du Théâtre, à Kiew (Russie).

DEMICHEL, Constructeur d'instruments pour les Sciences, 24, rue Pavée-au-Marais.

MM.

DEPREZ (**Marcel**), Membre de l'Institut, Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, 23, avenue Marigny, à Vincennes.

DESCHAMPS (**Dr Eugène**), Professeur de Physique à l'École de Médecine de Rennes.

DESLANDES, ancien Officier de marine, 20, rue La Rochefoucauld.

DESLANDRES, ancien élève de l'École Polytechnique, 43, rue de Rennes.

DESPRATS (**André**), Principal du Collège de Bruyères (Vosges).

DESROZIERS, Ingénieur civil des Mines, 74, rue Condorcet.

DETAILLE (**Charles**), Professeur au Lycée, 18, rue Charbonnerie, à Saint-Brieuc.

DEVAUD, Professeur au Lycée, 2, rue Charles-Nodier, à Besançon.

DEVAUX, Professeur au Lycée de Lorient.

DEVAUX (**Henri**), Docteur ès sciences, à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

D'HENRY (**Louis**), 6, boulevard de Port-Royal.

DIDELOT (**Léon**), Professeur à la Faculté de Médecine de Lyon.

DIDIER (**Paul**), Docteur ès sciences, Examinateur d'admission à l'École spéciale militaire, 17, rue Malebranche.

DIETRICH (**Ch.**), Dessinateur et graveur, 3, rue Hautefeuille.

DIERMAN (**William**), Ingénieur électricien, Directeur de la Société anonyme belge pour l'éclairage et la transmission électrique à grande distance, 27, rue de la Sablonnière, à Bruxelles (Belgique).

DIGEON (**J.**), Ingénieur-Constructeur, 15, 17, et 19 rue du Terrage.

DINI (**Urbain**), Ingénieur de la Maison Dumoulin-Froment, 48, rue Gassendi.

DIOT, Professeur au Lycée Condorcet.

DOIGNON (**L.**), Ingénieur construсteur, 30, rue du Luxembourg.

DOLLFUS (**Eugène**), Chimiste, fabricant d'indiennes, 32, rue d'Altkirch, à Mulhouse (Alsace).

DOMMER, Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, 10, avenue Mac-Mahon.

DONGIER (**Raphaël**), Agrégé, préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 27, rue Gay-Lussac.

DORGEOT (**Gabriel**), Capitaine d'Artillerie, en garnison à Saint-Servan.

DOUCEUR, Directeur des Postes et Télégraphes, retraité, 42, rue Jouffroy.

DRINCOURT, Professeur au Collège Rollin, 52, rue Condorcet.

DROUIN (**Félix**), Ingénieur, 12, rue Descombes.

DUBOIS, Professeur au Lycée, 31, rue Cosette, à Amiens.

DUBOIS (**René**), Professeur à l'École Turgot, 13, rue de Cluny.

DUBOSCQ (**Albert**), Constructeur d'instruments d'Optique et de précision, 39, quai de la Tournelle.

DUCHEMIN, Ingénieur, 37, boulevard de la Tour-Maubourg.

DUCLAUX, Membre de l'Institut, Professeur à l'Institut agronomique, 35 *ter*, rue de Fleurus.

DUCLOS, ancien Directeur d'École normale, à Cerisols, par Sainte-Croix-de-Volvestre (Ariège).

MM.

DUCOMET, Ingénieur, 7-9, rue d'Abbeville.

DUCOTTÉ, Directeur de l'Usine électrique du Casino municipal, 6, rue de France, à Nice.

DUCRETET, Constructeur d'instruments de Physique, associé de M. Lejeune, 75, rue Claude-Bernard.

DUFET, Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, Professeur au Lycée Saint-Louis, 35, rue de l'Arbalète.

DUFOUR (**Henri**), Professeur de Physique à l'Université La Casita, à Lausanne (Suisse).

DUHEM (**P.**), Professeur à la Faculté des Sciences, 18, rue de la Teste, à Bordeaux.

DUMOULIN-FROMENT, Constructeur d'instruments de précision, 85, rue Notre-Dame-des-Champs.

DUPAYS (**Charles**), Professeur au Lycée Janson de Sailly, 51, rue Scheffer, Villa 17, Passy-Paris.

DUPRÉ, Inspecteur honoraire de l'Académie de Paris, 136 *bis*, avenue de Neuilly, à Neuilly (Seine).

DUSSY, Professeur au Lycée, 46, rue Saint-Lazare, à Dijon.

DUTER, Professeur au Lycée Henri IV, 16, rue Bertin-Poiré.

DVORÁK (Dr **V.**), Professeur à l'Université d'Agram (Autriche-Hongrie).

DYBOWSKI (**A.**), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 16, rue Rottembourg.

EBEL, Ingénieur en Chef du Secteur électrique des Champs-Élysées, 2, avenue des Ternes.

EDELBERG, Ingénieur opticien, à Kharkoff (Russie).

EGOROFF (**Nicolas**), Professeur de Physique à l'Académie de Médecine de Saint-Pétersbourg (Russie).

EGOROFF (**Serge**), Observateur à l'Observatoire de Paulauwsk, près Saint-Pétersbourg (Russie).

EIFFEL (**Gustave**), Ingénieur, 1, rue Rabelais.

ÉLIE (**B.**), Professeur au Collège, 90, rue de la Pointe, à Abbeville.

ENGEL, Professeur à l'École Centrale, 50, rue d'Assas.

ESTRADA (**Francisco**), Recteur de l'Institut de San-Luis de Potosi (Mexique).

ÉTIENNE (**Louis**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et de la Compagnie P.-L.-M., 50, boulevard Saint-Michel.

FABRY (**Charles**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 2, place de la Corderie, à Marseille.

FAILLOT, Professeur au Lycée de Nancy.

FAIVRE-DUPAIGRE (**J.**), Professeur au Lycée Saint-Louis, 95, boulevard Saint-Michel.

FAURE (**Camille A.**), Ingénieur, 35, avenue de la République.

FAVÉ, Ingénieur hydrographe de la Marine, 1, rue de Lille.

FAVARGER, Ingénieur électricien, à Neuchâtel (Suisse).

MM.

FERNET, Inspecteur général de l'Instruction publique, 9, rue de Médicis.

FIGUIER (Dr **Albin**), Professeur à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, 17, place des Quinconces, à Bordeaux.

FIZEAU, Membre de l'Institut, 3, rue de l'Estrapade.

FONTAINE (**Hippolyte**), Ingénieur électricien, 52, rue Saint-Georges.

FONTAINE, Chimiste, 20, rue Monsieur-le-Prince.

FONTAINE (**Émile**), Professeur au Lycée, 4, rue du Tambour d'argent, à Sens.

FOURNIER (le Dr **Alban**), à Rambervillers (Vosges).

FOURTEAU, Proviseur du Lycée Janson de Sailly, 106, rue de la Pompe.

FOUSSEREAU, Secrétaire de la Faculté des Sciences, 56, boulevard de Port-Royal.

FOVEAU DE COURMELLE (le D^r), 26, rue Le Peletier.

FRICKER (le D^r), 10, rue Duperré.

FRIEDEL (**Ch.**) Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 9, rue Michelet.

FROC (le Père), à l'Observatoire de Zi-Ka-Weï près Chang-Haï (Chine).

FRON, Météorologiste titulaire au Bureau central météorologique, 19, rue de Sèvres.

GAIFFE (**Georges**), Constructeur d'instruments de Physique, 40, rue Saint-André-des-Arts.

GALANTE, Constructeur d'instruments de Chirurgie, 2, rue de l'École-de-Médecine.

GALIMARD, Pharmacien de 1re classe, 42, rue des Forges, à Dijon.

GALL (**Henry**), Directeur de l'Usine des Produits chimiques, à Villers, par Hermes (Oise).

GAMET, Professeur au Lycée, 4, rue Villeneuve, à Marseille.

GARBAN, Inspecteur d'Académie, à Alençon.

GARBE, Professeur à la Faculté des Sciences de Poitiers.

GARÉ (l'Abbé), Professeur à l'École Saint-Sigisbert, à Nancy.

GARIEL (**C.-M.**), Membre de l'Académie de Médecine, Professeur à la Faculté de Médecine, 6, rue Édouard-Detaille.

GARNUCHOT, Professeur au Collège, 37, rue Saint-Barthélemy, à Melun.

GAUBERT, Horloger électricien, à Gruissan (Aude).

GAUTHIER-VILLARS, Imprimeur-Éditeur, ancien élève de l'École Polytechnique, 55, quai des Grands-Augustins.

GAUTHIER-VILLARS (**Albert**), Imprimeur-Éditeur, ancien élève de l'École Polytechnique, 55, quai des Grands-Augustins.

GAY (**Henri**), Professeur en congé, 163, boulevard Voltaire.

GAY (**Jules**), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 16, rue Cassette.

GAYON, Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de la Station agronomique, 41, rue Permantade, à Bordeaux.

GENDRON (**Rodolphe**), Préparateur de Physique à l'Institut catholique, 6, rue Gassendi.

MM.

GENEST (**Eugène**), Professeur à la Faculté libre des Sciences, 38, rue de Brissac, à Angers.

GEORGUIEWSKY (**Nicolas**), rue Schpalernaja, maison 30, Log. 3 à Saint-Pétersbourg (Russie).

GÉRARD (**Anatole**), Ingénieur électricien, 16, rue des Grandes-Carrières.

GÉRARD (**Éric**), Directeur de l'Institut électrotechnique de Montefiore, à Liège.

GERNEZ, Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, 18, rue Saint-Sulpice.

GHESQUIER (l'Abbé), Professeur à l'Institution Notre-Dame-des-Victoires, 76, rue du Collège, à Roubaix.

GILBAULT, Professeur au Lycée, 31, rue Pargaminières, à Toulouse.

GIRARD (**Charles**), Directeur du Laboratoire municipal, 7, rue du Bellay.

GIRARDET, Professeur honoraire au Lycée Saint-Louis, ancien Membre du Conseil supérieur de l'Instruction publique, 90, rue Claude-Bernard.

GIRAULT, Professeur au Collège Chaptal, 8, rue Claude-Pouillet.

GIROUX, Ingénieur opticien, successeur de M. Roulot, 58, quai des Orfèvres.

GIVERT, Professeur au Lycée de Bourges.

GODARD (**Léon**), Docteur ès sciences, 20, rue Monsieur le Prince.

GODART, Professeur au Collège, 9, rue de Lancry, à Compiègne,

GODEFROY (l'Abbé **L.**), Ancien Professeur de Chimie à l'Institut catholique.

GODFRIN, Professeur au Lycée, 12, rue André, à Lille.

GODRON (**Henri**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 9, rue des Grandes-Poteries, à Alençon.

GODY (**G.**), Architecte du département des travaux publics, 15, rue du Viaduc, Bruxelles (Belgique).

GOLAZ (**L.**), Constructeur d'instruments à l'usage des Sciences, 282, rue Saint-Jacques.

GOLDHAMMER (**Démétrius**), Professeur de Physique à l'Université de Kasan (Russie).

GOLOUBITZKY (**Paul**), Collaborateur de la Société des Amis des Sciences de Moscou, à Kalouga Faroussa (Russie).

GOSSART (**Fernand**), Docteur en droit, 15, rue Tronchet.

GOSSART (**Émile**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 45, cours d'Albret, à Bordeaux.

GOSSIN, Proviseur honoraire à la Flèche.

GOURÉ DE VILLEMONTÉE, Professeur au Lycée Buffon, 31, rue de Poissy.

GOUY (**G.**), Professeur à la Faculté des Sciences, 68, rue de la Charité, à Lyon.

GRAJON (**A.**), Docteur en Médecine, à Vierzon.

GRAMONT (**Arnaud de**), Licencié ès Sciences physiques, 81, rue de Lille.

GRAU (**Félix**), Professeur au Lycée de Troyes.

GRAY (**Matthew**), Directeur de l'India-Rubber, Gutta-percha and Telegraph Works C°, 106, Cannon street, Londres (Angleterre).

GRAY (**Robert Kaye**), Ingénieur électricien de l'India-Rubber, Gutta-percha and Telegraph Works C°, Silwertown, Essex, à Londres (Angleterre).

MM.

GREFFE, Professeur au Lycée de Brest.

GRÉHANT (Dr), Professeur de Physiologie générale, au Muséum, 17, rue Berthollet.

GRELLEY, Directeur de l'École Supérieure du Commerce, 102, rue Amelot.

GREZEL (Louis), Professeur de Physique au Collège d'Autun.

GRIPON, Professeur à la Faculté des Sciences, 12, rue du Mont-Thabor, à Rennes.

GRIVEAUX, Professeur au Lycée, 16, rue Montbrillant, à Mont-Plaisir, Lyon.

GROGNOT (L.), Chimiste, Essayeur du Commerce, rue du Bourg, à Chantenay-sur-Loire (Maison Chopin) (Loire-Inférieure).

GROOT (le P. **L.-Th. de**), Kerkstraat, 14, Oudenbosch (Hollande).

GROSSETESTE (William), Ingénieur civil, 11, rue des Tanneurs, à Mulhouse (Alsace).

GROUVELLE, Ingénieur, Professeur à l'École Centrale, 18, avenue de l'Observatoire.

GRUEY-VIARD, Constructeur d'instruments de Physique, rue de la Liberté, à Dijon.

GUEBHARD (Dr **Adrien**), Agrégé de Physique de la Faculté de Médecine, villa Mendiguren, à Nice.

GUERBY (A.), Professeur en retraite, boulevard Fragonard, à Grasse (Alpes-Maritimes).

GUÉROULT (Georges), Trésorier-Payeur général, 5 *bis*, rue de Fougères, à Rennes.

GUILLAUME (Ch.-Ed.), Docteur ès sciences, attaché au Bureau international des Poids et Mesures, au Pavillon de Breteuil, à Sèvres.

GUILLEBON (de), Contrôleur de l'exploitation au chemin de fer d'Orléans, 11, rue du Bourg-Neuf, Orléans.

GUILLEMIN (l'abbé), Professeur de Sciences mathématiques et physiques à l'Externat de la rue de Madrid, 1, avenue Marigny.

GUILLOZ (Dr **Th.**), Agrégé-Chef des travaux du laboratoire de Physique médicale à la Faculté de Médecine, 7, rue Saint-Nicolas, à Nancy.

GUINARD (A.), Armurier, 8, avenue de l'Opéra.

GUNTZ, Professeur à la Faculté des Sciences, 9, rue de l'Hospice, à Nancy.

GUYE (Philippe A.), Docteur ès sciences, Professeur de Chimie à l'Université de Genève (Suisse).

GUYE (Ch.-Ed.), Docteur ès sciences, 83, boulevard des Philosophes, route du Chêne, à Genève (Suisse).

HAGENBACH-BISCHOFF, Professeur à l'Université de Bâle (Suisse).

HALE (George), Directeur de l'Observatoire, Chicago (États-Unis).

HALLER (A.), Professeur de Chimie générale à la Faculté des Sciences de Nancy.

HANRIOT, Professeur honoraire de Physique de la Faculté des Sciences de Lille à Joppécourt, par Mercy-le-Bas (Meurthe-et-Moselle).

MM.

HARTL (Colonel), Attaché à l'Institut géographique militaire de Vienne (Autriche).

HAUDIÉ (**Edgard**), Agrégé de l'Université, 30, avenue de l'Observatoire.

HEMARDINQUER, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 8, rue des Francs-Bourgeois.

HENOCQUE (le Dr), Directeur-adjoint au Laboratoire de Médecine de l'École des Hautes Études au Collège de France, 11, avenue Matignon.

HENRY (**Édouard**), Professeur au Lycée, 47, rue de la Comédie, à Lorient.

HENRY (**A.**), Professeur au Lycée, 1, rue du Trésor, à Reims.

HEPITÈS (**Stefan**), Directeur de l'Institut météorologique de Roumanie, à Bucarest.

HÉRISSON (**Albert**), Inspecteur général de l'Agriculture, Professeur à l'Institut agronomique, 49, avenue de l'Opéra, et 12 *bis*, quai de la Fontaine, à Nîmes.

HESEHUS (**N.**), Professeur à l'Institut Technologique, à Saint-Pétersbourg (Russie).

HILLAIRET (**André**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 22, rue Vicq-d'Azir.

HIRSCH, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 1, rue Castiglione.

HODIN, Inspecteur d'Académie, à Mende.

HOMÉN (**Theodor**), Docteur ès sciences, agrégé à l'Université d'Helsingfors (Finlande).

HOSPITALIER, Ingénieur des Arts et Manufactures, Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, 12, rue de Chantilly.

HOSTEIN, Professeur au Lycée, 37, rue Isabey, Nancy.

HOULLEVIGUE, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Lyon.

HUDELOT, Répétiteur à l'École Centrale, 10, rue Saint-Louis-en-l'Ile.

HUGON, Ingénieur, 77, rue de Rennes.

HUGUENY, Professeur honoraire de Faculté, 68, route de la Wantzenau, à Strasbourg-Rubertsau (Alsace).

HURION, Professeur à la Faculté des Sciences, 65, rue Blattin, Clermont-Ferrand.

HURMUZESCU (**Dragomir**), Licencié de la Faculté de Bucarest, 22, rue Berthollet.

HUSSON (**Léon**), Contrôleur du Câble télégraphique à Haïphong (Tonkin).

HUTIN (**Maurice**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 10, avenue Trudaine.

IMBAULT (**G.**), Professeur au Lycée de Tunis (Tunisie).

IMBERT (**Armand**), Professeur de Physique à la Faculté de Médecine de Montpellier.

INFREVILLE (**Georges d'**), Ex-Électricien de la *Western Union Telegraph C°*, Expert de la *National Bell Telephone C°*, 110, Liberty street, à New-York (États-Unis).

IVANOFF (**Basile**), Licencié ès sciences (maison Ivanoff), à Simpheropol Russie).

MM.

IZARN (**Joseph**), Professeur au Lycée Pascal, 2, rue d'Amboise, à Clermont-Ferrand.

JAMBART, Professeur au Lycée de Cahors.

JANET (**Paul**), Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, Chargé de Cours à la Faculté des Sciences, de Paris, 180, boulevard Saint-Germain

JANNETTAZ (**Ed.**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, Assistant de Minéralogie au Muséum, 86, boulevard Saint-Germain.

JANNIN, Professeur de Physique en retraite, 10, rue du Jardin national, à Albi.

JANSSEN, Membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire d'Astronomie physique, à Meudon.

JARNIGON (**Georges**), Ingénieur électricien, 25, rue Saint-Sébastien.

JARRE (**L.**), 2, rue des Pyramides.

JAUMANN (Dr **G.**), Professeur de Chimie et de Physique de l'Université de Prague (Autriche).

JAVAL, Membre de l'Académie de Médecine, Directeur du Laboratoire d'Ophtalmologie de la Faculté des Sciences, 52, rue de Grenelle.

JAVAUX (**Émile**), Directeur de la Société des ateliers Gramme, 33, rue Clavel.

JÉNOT, Professeur au Collège Rollin, 17, rue Caulaincourt.

JEUNET, ancien Professeur, 15, avenue de la Défense de Paris, à Puteaux (Seine).

JOANNIS (l'abbé **de**), Licencié ès Sciences physiques et mathématiques, 15, rue Monsieur.

JOBIN (**A.**), ancien élève de l'École Polytechnique, successeur de M. Léon Laurent, 21, rue de l'Odéon.

JOLY, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 2 *bis*, square du Croisic.

JOSEPH (**Paul**), ancien élève de l'École Polytechnique, 26, avenue de Montsouris.

JOUBERT, Inspecteur général de l'Instruction publique, 67, rue Violet.

JOUBIN, Professeur à la Faculté des Sciences de Besançon.

JOUET, 60, rue Pierre-Charron.

JOUKOWSKI (**Nicolas**), Professeur de Mécanique à l'Université et à l'École des Hautes Études de Moscou (Russie).

JOYEUX (**Eugène**), 10, avenue de Bellevue, à Sèvres.

JUNGFLEISCH, Professeur à l'École supérieure de Pharmacie, 38, rue des Écoles.

JUSSIEU (**F. de**), Imprimeur, Directeur du journal *l'Autunois*, 4, Grand'Rue, à Autun.

KAPOURTINE (**Théodore**), Professeur à l'Université de Tomsk (Sibérie).

KELVIN (**W. Thomson, Lord**) F. R. S., Professeur à l'Université de Glascow (Écosse).

KERANGUÉ (**Yves de**), Capitaine en retraite, à Kernouël, près Paimpol (Côtes-du-Nord).

KNOLL, Préparateur de Physique au Lycée Louis-le-Grand.

KŒCHLIN (**Horace**), Chimiste, 19, avenue du Mont-Riboudet, à Rouen.

MM.

KŒNIG, Constructeur d'instruments d'Acoustique, 27, quai d'Anjou.

KOROLKOFF (**Alexis**), Lieutenant-colonel d'Artillerie russe, Professeur de Physique à l'Académie d'Artillerie de Saint-Pétersbourg (Russie).

KOTCHOUBEY, Président de la Société Impériale Polytechnique, à Saint-Pétersbourg (Russie).

KOWALSKI, Professeur à l'École supérieure du Commerce et de l'Industrie, 1, rue de Grassi, à Bordeaux.

KOWALSKI (**Joseph de**), Professeur à l'Université de Fribourg (Suisse).

KREICHGAUER, Docteur ès sciences, 15, Marchstrasse, Charlottenburg, près Berlin (Allemagne).

KROUCHKOLL, Docteur ès sciences et Docteur en Médecine, Chef des Travaux de Physique, à la Faculté des Sciences, 6, rue Édouard-Detaille.

LABATUT, Professeur suppléant à l'École de Médecine et de Pharmacie de Grenoble.

LACOUR (**Alfred**), Ingénieur civil des Mines, 60, rue Ampère.

LAFFARGUE (**Joseph**), Licencié ès Sciences physiques, Ingénieur électricien, 70, boulevard Magenta.

LAFLAMME (l'abbé), Membre de la Société Géologique de France, Doyen de la Faculté des Sciences, à l'Université Laval, à Québec (Canada).

LAFOREST (Général Comte **de**), 3, cours de la République, à Libourne.

LAGRANGE (**L.**), Professeur de Physique à l'École militaire, 60, rue des Champs-Élysées, à Bruxelles (Belgique).

LALA (**Ulysse**), Docteur ès sciences, Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences, Professeur de Mécanique à l'École des Beaux-Arts et des Sciences industrielles, 11, rue d'Aubuisson, à Toulouse.

LALANDE (**de**), Ingénieur civil des Mines, ancien élève de l'École Polytechnique, 106, boulevard Saint-Germain.

LAMOTTE, Agrégé, Préparateur au Laboratoire d'Enseignement de la Faculté des Sciences, 9, rue Berthollet.

LANCELOT, Constructeur d'instruments d'Acoustique, 70, avenue du Maine.

LANGLADE, Ingénieur de la Cie d'éclairage électrique, 19 *bis*, place du Palais-de-Justice, à Tours.

LAPRESTÉ, Professeur au Lycée Buffon, 7, rue Charlet.

LAROCHE (**Félix**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 110, avenue de Wagram.

LAROCQUE, Directeur de l'École des Sciences, à Nantes.

LAROUSSE (**Auguste**), Chargé de Cours au Lycée, 16, boulevard de Vesone, à Périgueux.

LATCHINOW, Professeur à l'Institut du corps forestier, à Saint-Pétersbourg (Russie).

LATOUR, Professeur honoraire, 4 *bis*, rue Daillière, à Angers.

LAURENT (**Léon**), Constructeur d'instruments d'Optique, 21, rue de l'Odéon.

LAURIOL (**P.**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 83, boulevard Saint-Michel.

MM.

LAVIÉVILLE, Sous-Directeur des Études scientifiques au Lycée Saint-Louis.

LAVERDE (Dr **Jésus Oloya**), à Bucaramanga (États-Unis de Colombie).

LAWTON (**George Fleetwood**), Ingénieur-Directeur de l'Eastern Telegraph C°, à Marseille.

LEBARD (**P.**), Professeur au Lycée d'Angoulême.

LEBEDEFF (**Jean**), Préparateur au Laboratoire de Physique de l'Académie de Médecine, à Saint-Pétersbourg (Russie).

LE BEL (**J.-A.**), Ancien Président de la Société chimique, 25, rue Franklin.

LEBLANC (**Maurice**), ancien élève de l'École Polytechnique, 63, allée du Jardin-Anglais, au Raincy.

LECAT, Professeur au Lycée Janson de Sailly, 7, rue Gustave-Courbet.

LECHAT, Professeur honoraire du Lycée Louis-le-Grand, 4, rue de Calais.

LE CHATELIER (**André**), Ingénieur des Constructions navales, 25, cours Gambetta, à Lyon.

LE CHATELIER (**Henry**), Ingénieur des Mines, Professeur de Chimie générale à l'École des Mines, 73, rue Notre-Dame-des-Champs.

LE CHATELIER (**Louis**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 95, rue de Rennes.

LE CORDIER (**Paul**), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, 54, rue de Bordeaux, à Chamalières.

LEDEBOER, Docteur ès sciences, Villa Montmorency, 5, avenue du Square, à Auteuil.

LEDUC, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 136, rue d'Assas.

LEDUC (Dr **Stephane**), Professeur à l'École de Médecine, 5, quai Fossé, à Nantes.

LEFEBVRE, Capitaine au 95e d'infanterie, au camp d'Avor.

LEFEBVRE (**E.**), Professeur honoraire à Menotey (Jura).

LEFEBVRE (**Pierre**), Professeur au Lycée, 34, rue de Bellaing, à Douai.

LEFEVRE (**Julien**), Professeur au Lycée, 2, place Saint-Pierre, à Nantes.

LEFEVRE, Préparateur de Physique au Lycée d'Amiens.

LEJEUNE (**L.**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Associé de M. Ducretet, 75, rue Claude-Bernard.

LELORIEUX (**V.**), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 135 *bis*, boulevard Montparnasse.

LEMOINE (**E.**), ancien élève de l'École Polytechnique, 5, rue Littré.

LEMOINE (**Georges**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Examinateur de sortie à l'École Polytechnique, 76, rue d'Assas.

LEMOINE (**Jules**), Professeur au Lycée Saint-Louis, 43, rue Claude-Bernard.

LEMSTRÖM (**Selim**), Professeur de Physique à l'Université de Helsingfors (Finlande).

LÉON (**Gustave**), Ingénieur des Mines, à Valenciennes.

LEPERCQ (**Gaston**), Professeur de Chimie à la Faculté libre, 25, rue du Plat, à Lyon.

LEQUEUX (**P.**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 64, rue Gay-Lussac.

MM.

LERAY (l'Abbé **Ad.**), Eudiste, 23, rue des Fossés-Saint-Jacques.

LERMANTOFF, Préparateur au Cabinet de Physique de l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

LE ROUX, Examinateur à l'École Polytechnique, 120, boulevard Montparnasse.

LEROY, Professeur au Lycée Michelet, 245, boulevard Raspail.

LEROY, Médecin-Major de 1re classe au 160e régiment d'infanterie, à Toul.

LESAGE, Professeur au Lycée de Châteauroux.

LESOBRE, Professeur au Collège de Melun.

LESPIAULT, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

LEUILLIEUX (Dr), Médecin de la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest, à Conlie (Sarthe).

LÉVY (**Armand**), Professeur de Physique, rue de Cazault, 120, à Alençon.

LHUILLIER, Professeur au Prytanée de La Flèche.

LIMB (**Claudius**), Ingénieur, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 104, rue d'Assas.

LINDÉ, Ingénieur électricien, à Saint-Pétersbourg (Russie).

LIPPICH (**Fr.**), Professeur à l'Université de Prague (Autriche).

LIPPMANN, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 10, rue de l'Éperon.

LOISELEUR, Professeur au Collège, 92, rue de Lyon, à Libourne.

LORRAIN (**James-Grieves**), Consulting Engineer Norfolk House, Norfolk street, London. W. C. (Angleterre).

LOUGUININE (**W.**), Dr honoraire, Professeur de Thermochimie à l'Université de Moscou (Russie).

LUBOSLAWSKY (**Gennady**), Préparateur au Laboratoire de Physique de l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

LUCCHI (Dr **Guglielmo de**), Professeur de Physique au Lycée royal Tito Livio, Padoue (Italie).

LUGGIN (Dr **H.**), au laboratoire du Professeur Arrhénius, à Stockholm (Suède).

LUGOL, Professeur au Lycée, cité Chabrol, Maison Dauzat, à Clermont-Ferrand.

LUMIÈRE (**Auguste**), Ingénieur-Chimiste, cours Gambetta, à Monplaisir (Lyon).

LUMIÈRE (**Louis**), Ingénieur-Chimiste, cours Gambetta, à Monplaisir (Lyon).

LUSSANA (**Silvio**), Docteur ès Sciences physiques à l'Institut Physique de l'Université de Sienne (Italie).

LUTZ, Constructeur d'instruments d'Optique, 65, boulevard Saint-Germain.

LYON (**Gustave**), ancien élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, 24 *bis*, rue Rochechouart.

MACÉ DE LÉPINAY, Professeur à la Faculté des Sciences, 105, boulevard Longchamps, à Marseille.

MACH (Dr **E.**), Professeur de Physique à l'Université de Prague (Autriche).

MACQUET (**Auguste**), Ingénieur au corps des Mines, Directeur de l'École

MM.

provinciale d'Industrie et des Mines du Hainaut, 22, boulevard Dolez, à Mons (Belgique).

MADAMET, Directeur des Forges et Chantiers de la Méditerranée, à Marseille.

MAGNE (P.), Directeur-Ingénieur du contrôle des Postes et des Télégraphes, 34, avenue de Villiers.

MAIGRET (Dr), 86, avenue de la République, à Montrouge (Seine).

MAINGIE, Docteur ès Sciences physiques et mathématiques, 218, avenue de la Reine, à Laeken, Bruxelles (Belgique).

MAISONOBE, Capitaine d'Artillerie, ateliers de construction, 3 *bis*, rue de la Chappe, à Bourges.

MALDINEY (J.), Président de la Société de Photographie du Doubs, Préparateur à la Faculté des Sciences de Besançon.

MALLY (Dr **Francis**), 47, rue de Rome.

MALOSSE, Professeur à l'École de Médecine d'Alger.

MALTÉZOS, Docteur ès sciences, 6, rue Flatters.

MANEUVRIER, Agrégé de l'Université, Sous-Directeur du Laboratoire des recherches physiques à la Sorbonne, 54, rue Notre-Dame-des-Champs.

MANY, Professeur de Physique à l'École des Ponts et Chaussées, à Bucarest (Roumanie).

MARAGE (Dr), Docteur ès sciences, 15, place de la Madeleine.

MARCHIS, Professeur au Lycée de Caen.

MAREY, Membre de l'Institut, 11, boulevard Delessert.

MARIA (Emile), Professeur à l'École Turgot, 14, rue de Longchamp.

MARTIN (Ch.), rue de Bonneval, à Chartres.

MARSAL (A.) Professeur au Lycée d'Agen.

MARTIN (Joanny), Préparateur à la Faculté des Sciences, 6, rue des Capucins, à Lyon.

MARTINET, Professeur au Lycée Janson de Sailly, 5, rue de l'Amiral-Courbet.

MARTINET, Professeur au Prytanée militaire, à la Flèche.

MASCART, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, Directeur du Bureau central météorologique, 176, rue de l'Université.

MASSE (Maurice), ancien élève de l'École Polytechnique, Ingénieur des Mines, place du Vœu, à Nice.

MASSIEU (F.), Professeur honoraire de la Faculté des Sciences de Rennes, Inspecteur général des Mines, 18, avenue d'Antin.

MASSIN, Ingénieur des Télégraphes, 103, rue de Grenelle.

MASSON (G.), Libraire-Éditeur, 120, boulevard Saint-Germain.

MATHIEU, Professeur au Lycée de Cherbourg.

MATHIAS (Émile), Professeur à la Faculté des Sciences, 22, rue Sainte-Anne à Toulouse.

MAUMENÉ (E.), 91, avenue de Villiers.

MAUPEOU D'ABLEIGES (de), Ingénieur de la Marine, à Lorient.

MAURAIN (Charles), Agrégé-Préparateur au Collège de France.

MM.

MAURAT, Professeur honoraire au Lycée Saint-Louis, à Rochecorbon (Indre-et-Loire).

MELANDER, Préparateur à l'Université d'Helsingfors (Finlande).

MENDIZABAL TAMBORREL (de), Ingénieur géographe, à Mexico (Mexique).

MÉNIER (Henri), 8, rue de Vigny.

MERCADIER, Directeur des Études à l'École Polytechnique, 21, rue Descartes.

MERGIER (Dr), Préparateur des travaux pratiques de Physique à la Faculté de Médecine de Paris, 27, avenue d'Antin.

MÉRITENS (de), Ingénieur, 74, boulevard de Clichy.

MERLE (Antoine), Propriétaire de la maison Brunot-Court, boulevard Victor-Hugo, à Grasse.

MERLIN (Paul), Professeur au Lycée, 78, faubourg Vincent, à Châlons-sur-Marne.

MESLIN, Professeur à la Faculté des Sciences, 10, Boulevard Ledru-Rollin, Montpellier.

MESTRE, Ingénieur à la Cie des chemins de fer de l'Est, 168, rue Lafayette.

MÉTRAL (Pierre), Agrégé des Sciences physiques, Professeur à l'École Colbert, 239*bis*, rue Lafayette.

MEYER, Directeur de la Compagnie continentale Edison, 38, rue St-Georges.

MEYLAN, Ingénieur, 24, avenue du Nord, au Parc Saint-Maur (Seine).

MICHEL (Auguste), Constructeur d'instruments de Physique, 92, rue de Bondy.

MICHELSON (Albert), Professeur à l'Université de Chicago (États-Unis).

MICULESCU (Constantin), Professeur à l'Université de Bucarest (Roumanie).

MILLARD (J.-A.), Docteur en Médecine, au château Sunnyside, à Dinard-Saint-Enogat (Ille-et-Vilaine).

MINGASSON, Professeur au Lycée de Toulon.

MISLAWSKY (Dr), Professeur agrégé de Physiologie à l'Université de Kasan (Russie).

MOESSARD, Colonel du Génie, 58, rue de Vaugirard.

MOLTENI (A.), Ingénieur constructeur, 44, rue du Château-d'Eau.

MONNIER (D.), Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 1, rue Appert.

MONNORY (Henri), Professeur au Lycée, 59, avenue de Noailles, à Lyon.

MONOYER, Professeur à la Faculté de Médecine de Lyon.

MONTAUD (B. de), Ingénieur civil.

MONTEFIORE (Levi), Sénateur, Ingénieur, Fondateur de l'Institut électrotechnique, 35, rue de la Science, à Bruxelles (Belgique).

MONTEIL (Silvain), Juge de Paix à Châteauneuf-la-Forêt (Haute-Vienne).

MONTHIERS (Maurice), 50, rue Ampère.

MORANA (Ignace), Électricien, à Ragusa (Sicile).

MOREAU (Georges), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 13, rue Tronjolly, à Rennes.

MORELLE, Constructeur-Mécanicien, 39, avenue d'Orléans.

MM.

MORIN (**P.**), Professeur au Lycée, 25, rue Barathon, à Montluçon.

MORISOT (**J.**), Professeur à la Faculté des Sciences, 29, rue Lamourous, à Bordeaux.

MORS, Ingénieur, fabricant d'appareils électriques, 8, avenue de l'Opéra.

MOSER (**Dr James**), Privat-Docent à l'Université, 25, Laudon-gasse, Vienne VIII (Autriche).

MOUCHOT, Professeur en retraite, 56, rue Dantzig (5, passage Dantzig).

MOULIN (**Honoré**), Capitaine au 8e bataillon d'Artillerie de forteresse, à Épinal.

MOUREAUX (**Th.**), Météorologiste, Chef du service magnétique à l'Observatoire du Parc Saint-Maur (Seine).

MOURGUES, Conservateur du Musée minéralogique, Directeur du Laboratoire de Minerie, Professeur de Chimie à l'Université, Casilla, 97, à Santiago (Chili).

MOUSSELIUS (**Maximilien**), Employé à l'administration centrale des Télégraphes, rue Torgowaïa n° 13, Log. 4, à Saint-Pétersbourg (Russie).

MOUTON, Docteur ès sciences, 1, rue de l'Audience, à Fontenay-sous-Bois.

MUIRHEAD (**Dr Alexandre**) F. C. S., 5, Cowley Street, Westminster, S. W. Londres.

MUKHOPADHYAY (**Asutosh**), Membre de la Société de Physique de Londres, 77, Russa Road north, Bhowanipore, à Calcutta (Indes).

MÜLLER, Chef des Travaux chimiques à la Faculté des Sciences de Nancy.

NACHET (**A.**), Constructeur d'instruments d'Optique, 17, rue Saint-Séverin.

NACHET (**Camille**), Constructeur d'instruments d'Optique, 7, rue des Gravilliers.

NAMBA MASSASHI, à Seudaï (Japon).

NEGREANO (**D.**), Directeur du laboratoire de Physique de l'Université de Bucarest (Roumanie).

NERVILLE (**de**), Ingénieur des Télégraphes, Directeur du Laboratoire central d'électricité, 116, boulevard Haussmann ou au Laboratoire central, 12, rue de Staël.

NEUBURGER, Professeur au Lycée, 11, avenue du Vieux-Marché, à Orléans.

NEYRENEUF, Professeur à la Faculté des Sciences de Caen.

NODON (**Albert**), Ingénieur civil, à l'observatoire d'Astronomie physique de Meudon.

NODOT, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 3, rue Franoy, à Dijon.

NOË (**Charles**), Constructeur d'instruments pour les Sciences, 8, rue Berthollet.

NOGUÉ (**Émile**), Attaché à la Maison Pellin-Duboscq, 138, rue d'Assas.

NOLOT, Professeur au Lycée de Roanne.

NOTHOMB (**Louis**), Professeur de télégraphie technique à l'École de Guerre, 91, avenue Louise, à Bruxelles (Belgique).

NOUGARET (**Élie**), Censeur au Lycée de Saint-Brieuc.

OBSERVATOIRE DU BUREAU DES LONGITUDES, à Montsouris.

MM.

OFFRET (**Albert**), Maître de Conférences de Minéralogie à la Faculté des Sciences, 135, avenue de Saxe, à Lyon.

OGIER (**Jules**), Docteur ès sciences, Chef du laboratoire de Toxicologie, 1, quai d'Orsay.

OLIVIER (**Louis**), Docteur ès sciences, Directeur de la *Revue générale des Sciences pures et appliquées,* 34, rue de Provence.

OLLIVIER (**A.**), Ingénieur civil, 51, boulevard Beaumarchais.

ONDE, Professeur au Lycée Henri IV, 41, rue Claude-Bernard.

OUMOFF (**Nicolas**), Professeur de Physique à l'Université de Moscou (Russie).

OZENNE, Aide au Bureau international des Poids et Mesures, au Pavillon de Breteuil, à Sèvres.

PAILLARD-DUCLÉRÉ (**Constant**), Secrétaire d'Ambassade, 96, boulevard Haussmann.

PAILLOT, Chef des Travaux pratiques à la Faculté des Sciences, 32, rue Brule-Maison, à Lille.

PALAZ (**Adrien**), Docteur ès sciences, Professeur d'Électricité industrielle à l'Université de Lausanne (Suisse).

PALMADE, Professeur au Lycée de Bordeaux.

PALMADE, Capitaine du Génie, au Fort Saint-Sauveur, à Lille.

PANZANI (**J.-P.**), Licencié ès Sciences mathématiques et physiques, Directeur de l'École Descartes, 46, rue de la Tour.

PARAIRE (l'abbé), Licencié ès Sciences physiques, villa Violette, 22, rue Raynouard.

PARENTHOU (**Émile**), Ingénieur, 13, rue du Val-de-Grâce.

PARISSE, Ingénieur des Arts et Manufactures, 49, rue Fontaine-au-Roi.

PARMENTIER, 21, avenue de la Toison-d'Or, à Bruxelles (Belgique).

PASQUIER (Dr), rue Saint-Nicolas, à Evreux.

PAVILLARD, Professeur au Lycée de Montpellier.

PAVLIDÈS (**Démosthènes**), Docteur en Médecine, 14, rue Cadet.

PAYN (**John**), Directeur de l'Eastern Telegraph Co, au Caire (Égypte).

PELLAT (**H.**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 3, avenue de l'Observatoire.

PELLERIN, Professeur de Physique à l'École de Médecine, 9, quai Richebourg, à Nantes.

PELLIN (**Philibert**), Ingénieur des Arts et Manufactures, successeur de M. Jules Duboscq, 21, rue de l'Odéon.

PÉRARD (**L.**), Professeur à l'Université, 101, rue St-Esprit, à Liège (Belgique).

PEREZ (**Fernando Ferrari**), Professeur à l'École normale, Tacubaya D. F. à Mexico (Mexique).

PERNET (Dr **J.**), à l'École Polytechnique, à Zurich (Suisse).

PÉROT (**Alfred**), Professeur d'Électricité industrielle à la Faculté des Sciences, 119, boulevard de Longchamps, à Marseille.

PERREAU, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Nancy.

MM.

PETIT (**Paul**), Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy.

PÉTROFF, Professeur à l'Institut Technologique, Directeur du Département des chemins de fer au Ministère des voies et communications, à Saint-Pétersbourg (Russie).

PEUCHOT (**E.**), Dessinateur et graveur, 10, rue de Nesles.

PEUCHOT, Ingénieur opticien, 31, quai des Grands-Augustins.

PEYRARD (**Henri**), Répétiteur au Lycée Lakanal, à Sceaux (Seine).

PEYRUSSON (**Édouard**), Professeur de Chimie et de Toxicologie à l'École de Médecine et de Pharmacie de Limoges.

PFAUNDLER (**Léopold**), Professeur à l'Université de Gratz (Autriche).

PHILBERT, Ancien receveur des télégraphes, 32, faubourg de Fougères, à Rennes.

PHILIPPE (**A.**), Professeur au Lycée de Laon.

PHILIPPON (**Paul**), Répétiteur au Laboratoire d'Enseignement de la Sorbonne, 166, boulevard Montparnasse.

PICART (**A.**), Fabricant d'instruments de précision, 20, rue Mayet.

PICOU, Ingénieur des Arts et Manufactures, 75, avenue de la Grande-Armée.

PILLEUX, Électricien, 79, rue Claude-Bernard.

PILLON (**André**), Ingénieur des Arts et Manufactures, successeur de M. Deleuil, 42, rue des Fourneaux.

PILTSCHIKOFF (**Nicolas**), Professeur à l'Université d'Odessa (Russie).

PINEL (**Charles-Louis**), 26, rue Méridienne, à Rouen.

PIONCHON, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

PISCA (**Michel**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 89, rue de Tocqueville.

PLACE (le marquis **P.-L.-H. de**), Capitaine-commandant au 1er régiment de cuirassiers, 32, avenue Rapp.

POINCARÉ (**Antoni**), Inspecteur général des Ponts et Chaussées, 14, rue du Regard.

POINCARÉ (**Lucien**), Professeur à l'École normale supérieure de Sèvres, 17, rue d'Assas.

POINTELIN, Professeur de Physique au Lycée d'Amiens.

POIRÉ, Membre du Conseil supérieur de l'Instruction publique, Professeur au Lycée Condorcet, 95, boulevard Malesherbes.

POLLARD (**Jules**), Ingénieur de la Marine, 28, rue Bassano.

POMEY (**J.-B.**), Inspecteur-Ingénieur des Télégraphes, 58, boulevard Saint-Marcel.

PONSELLE (**Georges**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 114, avenue de Wagram.

PONSOT, Professeur au Lycée Condorcet, 51, rue Claude-Bernard.

POPOFF (**Alexandre**), Professeur à l'École des Torpilleurs marins, Classe des officiers de Marine, à Cronstadt (Russie).

POPP (**Victor**), Administrateur-Directeur de la Compagnie des horloges pneumatiques, 54, rue Étienne-Marcel.

MM.

PÖPPER (**Josef**), ancien élève de l'École Polytechnique de Vienne, Ingénieur constructeur de machines, VII, Westbahnstrass, 29, à Vienne (Autriche).

POTIER, Membre de l'Institut, Ingénieur en chef des mines, 89, boulevard Saint-Michel.

POUSSIN (**Alexandre**), Ingénieur, au Château de La Houblonnière, par Lisieux

PRÉAUBERT (**E.**), Professeur au Lycée, 13, rue Proust, à Angers.

PRÉOBRAJENSKI (**Pierre**), au Musée Polytechnique, à Moscou (Russie).

PRÉSIDENT (le) de la Société de Physique de Londres (Angleterre).

PRÉSIDENT (le) de la Société de Physique de Saint-Pétersbourg (Russie).

PUPIN, Secrétaire de la Faculté de Médecine de Paris.

PUYFONTAINE (Comte **de**), 34, avenue Friedland.

QUESNEVILLE (Dr), Professeur agrégé, à l'École supérieure de Pharmacie, 1, rue Cabanis.

RADIGUET, Opticien constructeur, 15, boulevard des Filles-du-Calvaire.

RAFFARD, Ingénieur civil, 5, avenue d'Orléans.

RAMEAU (**l'abbé**), Professeur de Physique à l'Institution Saint-Cyr, à Nevers.

RANQUE (**Paul**), Docteur en Médecine, 13, rue Champollion.

RAU (**Louis**), Administrateur délégué de la Compagnie Continentale Edison, 7, rue Montchanin.

RAVEAU, Répétiteur à l'Institut national agronomique, 5, rue des Écoles.

RAYET, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

RAYMOND (**Eugène**), Ingénieur de la Marine, à Toulon.

RECHNIEWSKI, Ingénieur électricien, 11, rue Lagrange.

RECOURA (**Albert**), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Lyon.

RÉGNARD (Dr **P.**), Membre de l'Académie de Médecine, Sous-Directeur du Laboratoire de Physiologie de la Faculté des Sciences, 224, boulevard Saint-Germain.

REISET (**Jules**), Membre de l'Institut, 2, rue de Vigny.

RENARD (**Charles**), Chef de bataillon du Génie, Directeur de l'Établissement central d'Aérostation militaire, 7, avenue de Trivaux, à Chalais-Meudon.

RENAULT (**A.**), Licencié ès Sciences physiques, 25, rue Brezin.

RIBAN (**Joseph**), Directeur adjoint du Laboratoire d'enseignement chimique et des Hautes Études, 85, rue d'Assas.

RIBIÈRE (**Charles**), Ingénieur des Ponts et Chaussées attaché au service des Phares, 13, rue Mignard.

RICHARD (**Jules**), Ingénieur-Constructeur, 8, impasse Fessart (Belleville).

RICHET (**Ch.**), Professeur à la Faculté de Médecine, 15, rue de l'Université.

RIGOLLOT, Chef des Travaux pratiques à la Faculté des Sciences de Lyon.

RIVIÈRE (**Charles**), Professeur au Lycée Saint-Louis, 81, boul. Saint-Michel.

ROBERT (**A.-C.**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 27, rue Saint-Sulpice.

ROBIN (**P.**), 6, rue Haxo.

MM.

ROBLES (**José de**), Ingénieur agronome, calle del General Castagnos, 7, à Madrid (Espagne).

RODDE (**Ferd.**), 7, rue du Delta.

RODDE (**Léon**), 107, rua do Ouvidor, à Rio-Janeiro (Brésil).

RODOCANACHI (**Emmanuel**), 54, rue de Lisbonne.

ROGER (**Albert**), rue Croix-de-Bussy, à Épernay.

ROGER, Chef d'Institution honoraire, 7, rue Faustin-Hélie.

ROGOWSKY (**Eugène**), Professeur au Laboratoire de Physique de l'Université, à Saint-Pétersbourg (Russie).

ROIG Y TORRES (**Raphaël**), Professeur à la Faculté des Sciences de Barcelone (Espagne).

ROLLAND, Professeur au Lycée de Chartres.

ROMILLY (**Félix de**), 25, avenue Montaigne.

ROMILLY (**Paul de**), Ingénieur en Chef des Mines, 7, rue Balzac.

ROSENSTIEHL, Chimiste, Directeur de l'usine Poirier, 61, route de Saint-Leu, à Enghien.

ROUSSEAU, Professeur à l'Université, 20, rue Vauthier, à Ixelles-Bruxelles. (Belgique).

ROUSSEAU (**Paul**), Fabricant de produits chimiques, 16, rue des Fossés Saint-Jacques.

ROUSSELET, Censeur du Lycée de Lille.

ROUSSELOT (l'abbé), Professeur à l'Institut catholique, 74, rue de Vaugirard.

ROUX (**Gaston**), Ingénieur électricien, 51, rue de Dunkerque.

ROUX, Ingénieur des Arts et Manufactures, Professeur à l'École Sainte-Geneviève, 114, boulevard Montparnasse.

ROWLAND, Professeur à l'Université Johns Hopkins, à Baltimore (États-Unis).

ROZIER (**F.**), Docteur en Médecine, 10, rue du Petit-Pont.

SACERDOTE (**Paul**), Professeur au Collège Ste-Barbe, 2, rue Jean de Beauvais.

SADOWSKY (**Alexandre**), Professeur à l'Université impériale de Physique à Juriew (Russie).

• **SAÏD** (**Dj.**), Ingénieur, 54, rue Notre-Dame-des-Champs.

SAINTE-CLAIRE DEVILLE (**Émile**), Ingénieur à la Compagnie du gaz, 9, rue Brémontier.

SAINTE-CLAIRE DEVILLE (**Henri**), Directeur des Manufactures de l'État, Manufacture des Tabacs de Reuilly, 319, rue de Charenton.

SALADIN (**Édouard**), Ingénieur civil des Mines, à la Cie de Junction City, 12, rue Roquépine.

SALCHER (**Dr P.**), Professeur à l'Académie Impériale de Fiume (Autriche-Hongrie).

MM.

SANDOZ (Albert), Préparateur des Travaux pratiques de Physique à la Faculté de Médecine, 11, rue Rataud.

SARASIN (E.), Docteur ès sciences, à Genève (Suisse).

SARRAN, Professeur au Lycée de Bordeaux.

SARRAU, Membre de l'Institut, Ingénieur en Chef des Poudres et Salpêtres, professeur de Mécanique à l'École Polytechnique, 9 *bis*, avenue Daumesnil, à Saint-Mandé.

SAUSSE (A.), Préparateur à la Faculté des Sciences de Caen.

SAUTTER (Gaston), Ingénieur, 26, avenue de Suffren.

SCHILLER (Nicolas), Professeur de Physique à l'Université de Kieff (Russie).

SCHNEIDER (Théodore), Professeur de Chimie à l'École Monge, 5, rue Bosio, à Auteuil.

SCHODDUIJN (l'abbé), Professeur de Sciences, à Bergues (Nord).

SCHÜRR, Chargé de Cours au Lycée, 25, rue Barathon, à Montluçon.

SCHWEDOFF, Doyen de la Faculté des Sciences, Professeur à l'Université d'Odessa (Russie).

SCIAMA, Ingénieur civil des Mines, directeur de la maison Bréguet, 16, rue François Ier.

SCOBELTZINE (Wladimir), Préparateur au Laboratoire de Physique de l'Université, à Saint-Pétersbourg (Russie).

SEBERT, Général d'Artillerie de Marine, Administrateur des Forges et Chantiers de la Méditerranée, 14, rue Brémontier.

SECRÉTAN (G.) Ingénieur opticien, 13, place du Pont-Neuf.

SÉGUIN, ancien Recteur, 1, rue Ballu.

SEIGNETTE (Adrien), Professeur au Lycée Condorcet, 21, rue Tronchet.

SELIGMANN-LUI, Sous-Inspecteur des Télégraphes, 103, rue de Grenelle.

SENTIS, Professeur au Lycée 17, boulevard de Roanne, à Grenoble.

SERPOLLET, Ingénieur, 27, rue des Cloys.

SERRÉ-GUINO, Examinateur à l'École de Saint-Cyr, 114, rue du Bac.

SIEGLER, Ingénieur en chef de la voie à la Compagnie des chemins de fer de l'Est.

SIGALAS (Dr C.), Agrégé, Chef des Travaux, chargé d'un Cours complémentaire de Physique à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, 4, rue Théodore-Ducos, à Bordeaux.

SIMOUTRE (l'abbé), Professeur de Physique au grand séminaire de Nancy.

SIRE (G.), Correspondant de l'Institut, à Besançon-Mouillière.

SIRVENT, Professeur au Lycée Saint-Louis, 73, rue de Rennes.

SLOUGUINOFF, Directeur de l'Institut de Physique de l'Université impériale de Kasan (Russie).

SOKOLOFF (Alexis), Professeur de Physique à l'Académie de Moscou (Russie).

SOMZÉE (Léon), Ingénieur honoraire des Mines, 22, rue du Palais, à Bruxelles (Belgique).

MM.

SORBIER (**J.**), Professeur au Lycée, 70, rue Bourg-Neuf, à Bayonne.

STACKELBERG (Baron **Édouard de**), au Laboratoire de Physique de l'Académie des Sciences de Saint-Pétersbourg (Russie).

STAPFER (**Daniel**), Ingénieur, boulevard de la Mayor, à Marseille.

STCHEGLAIEF (**Wladimir**), Professeur de Physique à la Haute École technique de Moscou (Russie).

STEPANOFF, Professeur de Physique, à Cronstadt (Russie).

STOKES (**G.-G.**), Professeur de Mathématiques à l'Université de Cambridge, Lensfield Cottage, Cambridge (Angleterre).

STOLETOW (**Al.**), Professeur à l'Université de Moscou (Russie).

STRAUSS, Chef du Génie, 16, boulevard de la Liberté, à Gap.

STREET (**Charles**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 39, rue Joubert.

SWYNGEDAUW, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Lille.

TACCHINI, Astronome, Directeur du Bureau météorologique d'Italie, à Rome.

TAILLEFER (**André**), ancien élève de l'École Polytechnique, 5, rue Bonaparte.

TEISSERENC DE BORT (**Léon**), Chef du Service de Météorologie générale au Bureau central météorologique, Secrétaire général de la Société Météorologique de France, 82, avenue Marceau.

TEISSIER, Professeur au Lycée, 5, rue de Lille, à Nice.

TEPLOFF, Colonel du Génie impérial russe, rue Vladimir Kaies, 15, maison Friedrichs, à Saint-Pétersbourg (Russie).

TERMIER, Ingénieur des Mines, Professeur à l'École nationale des Mines, 71, rue Claude-Bernard.

THENARD (le **baron Arnould**), chimiste agriculteur, 6, place Saint-Sulpice.

THIERRY (**Maurice de**), Docteur en Médecine, 119, rue d'Alésia.

THIESEN (Dr **Max**.), à Charlottemburg, Berlinerstrasse, 22, à Berlin.

THIMONT, Professeur au Collège Stanislas, 144, boulevard du Montparnasse.

THOMAS, Professeur à l'École supérieure des Sciences d'Alger.

THOMPSON (**Silvanus-P.**), Professeur à Finsbury Technical College, Morland, Chislett Road, West Hampstead, Londres, N. W. (Angleterre).

THOUVENEL, Professeur au Lycée Charlemagne, 100, rue de Rennes.

THOUVENOT (**Clovis**), Directeur della Societa electrotecnica, via delle Tre Pile, 3-8, à Rome (Italie).

TIMIRIAZEFF, Professeur à l'Université et à l'Académie agronomique de Moscou (Russie).

TISSANDIER (**Gaston**), Directeur du Journal « *La Nature* », 50, rue de Châteaudun.

TISSIER, Professeur au Lycée Voltaire, 1, rue Mirbel.

TISSOT, Enseigne de Vaisseau, chargé d'un Cours de Physique à l'École navale, 107, rue de Siam, à Brest.

TOMBECK, Licencié ès sciences, 8, square du Croisic.

MM.

TONARELLI, Proviseur du Lycée du Puy.

TORCHEBEUF (**Ch.**), Constructeur d'instruments de Physique, 13, rue du Val-de-Grâce.

TOUANNE (**de la**), Ingénieur des Télégraphes, 13, rue Soufflot.

TOUPOT (l'abbé **J.-E.**), Professeur à l'École Fénelon, à Bar-le-Duc.

TRIPIER (Dr), 41, rue Cambon.

TROOST, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 84, rue Bonaparte.

TROUVÉ (**G.**), Constructeur d'instruments de précision, 14, rue Vivienne.

TSCHERNING (Dr) Sous-Directeur du Laboratoire d'Ophtalmologie à la Faculté des Sciences, 15, rue de Mézières.

TULEU (**Charles**), Ingénieur, 58, rue Hauteville.

TURPAIN, Préparateur à la Faculté des Sciences, 104, rue de Pessac, à Bordeaux.

UCHARD (**A.**), Chef d'escadron d'Artillerie, 46, boulevard de l'Arsenal, à Bourges.

UNIVERSITÉ DE SYDNEY (**New South Wales**).

VACHER (**Paul**), 45, rue de Sèvres.

VAGNIEZ-BENONI, Négociant, 14, rue Lemerchier, Amiens.

VAGNIEZ (**Edouard**), 14, rue Lemerchier, à Amiens.

VAN AUBEL (**Dr Edmond**), Professeur à l'Université de Gand, 12, rue de Comines, à Bruxelles (Belgique).

VAN DER MENSBRUGGHE (**Gustave-Léonard**), Membre de l'Académie Royale, Professeur de Physique mathématique à l'Université, 80, rue Coupure, à Gand (Belgique).

VAN DER VLIETH, Professeur de Physique à l'Université de St-Pétersbourg. (Russie).

VANDEVYVER, Docteur ès sciences et Répétiteur à l'Université, 14, rue Saint-Amand, à Gand (Belgique).

VARACHE (**A.**), Professeur au Collège, 28, rue de la Rotonde, à Béziers.

VARENNE (**de**), Préparateur du Laboratoire de Physiologie générale au Muséum, 7, rue de Médicis.

VASCHY, Ingénieur des Télégraphes, Répétiteur à l'École Polytechnique, 68, avenue Bosquet.

VASSEUR (**Alfred**), 4, petite rue de Barette, à Amiens.

VAUTIER (**Théodore**), Professeur adjoint de Physique à la Faculté des Sciences, 30, quai Saint-Antoine, à Lyon.

VAYSSIÈRES (**Louis**), Chef des Travaux pratiques de Physique à la Faculté des Sciences, 9, rue Beaumont, à Marseille.

VELTER (**Jules**), Ingénieur des Arts et Manufactures, successeur de M. Deleuil, 42, rue des Fourneaux.

MM.

VERDIN (**Charles**), Constructeur d'instruments de Physiologie, 7, rue Linné,

VERNIER, Professeur au Lycée, 11, rue des Grandes Écoles, à Poitiers.

VERRIER (**J.-F.-G.**), Membre de plusieurs Sociétés savantes, 13, boulevard Saint-Germain.

VIDAL (**Léon**), Professeur à l'École des Arts décoratifs, 7, rue Scheffer.

VIEILLE, Ingénieur des Poudres et Salpêtres, Répétiteur à l'École Polytechnique, 19, quai Bourbon.

VIGNON, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Lyon.

VILLARD, Professeur au Lycée de Rouen.

VILLIERS (**Antoine**), Agrégé à l'École de Pharmacie, 30, avenue de l'Observatoire.

VINCENS, Licencié ès Sciences mathématiques et physiques, 59, rue d'Amsterdam.

VIOLET (**Léon**), 20, rue Delambre.

VIOLLE, Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, Maître de Conférences à l'École Normale, 89, boulevard Saint-Michel.

VLASTO (**Ernest**), Ingénieur, Administrateur de la Société anonyme de fabrication de produits chimiques, 44, rue des Écoles.

VOIGT, Professeur honoraire du Lycée de Lyon, à Géanges, par Saint-Loup de la Salle (Saône-et-Loire).

VOISENAT (**Jules**), Ingénieur des Télégraphes, 74, boulevard du Montparnasse.

WAHA (**de**), Professeur de Physique, à Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).

WALLON (**E.**), Professeur au Lycée Janson de Sailly, 65, rue de Prony.

WEILLER (**Lazare**), Ingénieur manufacturier, 52, boulevard Malesherbes.

WEISS (**Dr Georges**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur agrégé de Physique à la Faculté de Médecine, 119, boulevard Saint-Germain.

WEISS (**Pierre**), Attaché au Laboratoire de Physique de l'École Normale supérieure, 45, rue d'Ulm.

WENDT (**Gustave**), Constructeur d'instruments de Physique (maison Hempel), 55, quai des Grands-Augustins.

WERLEIN (**Ivan**), Constructeur d'instruments d'Optique, 71, rue du Cardinal-Lemoine.

WEST (**Émile**), Chef du laboratoire des Chemins de fer de l'Ouest, 29, rue Jacques-Dulud, à Neuilly-sur-Seine.

WEYHER, Ingénieur, Administrateur-Directeur de la Société centrale de Construction de Machines, 36, rue Ampère.

WIEDEMANN (**Eilhard**), Professeur de Physique, à Erlangen (Allemagne).

WITZ (**Aimé**), Ingénieur civil, Professeur aux Facultés catholiques, 29, rue d'Antin, à Lille.

WOLF, Membre de l'Institut, Astronome à l'Observatoire de Paris, Professeur à la Faculté des Sciences, 1, rue des Feuillantines.

MM.

WOULFF, Agrégé de l'Université de Varsovie (Russie).

WUILLEUMIER (**H.**), Docteur ès sciences, 98, rue d'Assas.

WUNSCHENDORFF, Ingénieur chargé de la construction des lignes souterraines, au Ministère des Postes et des Télégraphes, 92, rue de Rennes.

WYROUBOFF (**G.**), Docteur ès sciences, 141, rue de Rennes.

XAMBEU, Principal honoraire, 41, Grande-Rue, à Saintes.

YVON (P.), Pharmacien, 26, avenue de l'Observatoire.

ZAHM (le R. P. **J.-A.**), Professeur de Physique, à l'Université, à Notre-Dame (Indiana) (États-Unis).

ZEGERS (**Louis-L.**), Ingénieur des Mines du Chili, 63, S. Martin, à Santiago (Chili).

ZILOFF, Professeur de Physique, à l'Université de Varsovie (Russie).

ZUPP, Professeur au Lycée de Brest.

Juin 1895.

Prière d'adresser au Secrétaire général les rectifications et changements d'adresse.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

SÉANCE DU 5 JANVIER 1894 5

Rapport de la Commission des comptes sur l'exercice de 1892-1893. 7

LIPPMANN. — Allocution prononcée dans la séance du 5 janvier 1894.. 11

HENRY LE CHATELIER. — Les principes fondamentaux de l'Énergétique et leur application aux phénomènes chimiques. 13

SÉANCE DU 19 JANVIER 1894 50

H. ABRAHAM. — Sur la réciprocité des coefficients d'induction mutuelle 52

HURMUZESCU. — Nouvel isolant, appelé *diélectrine*, servant à la construction des appareils d'électricité statique 53

P. CURIE. — Sur la symétrie des phénomènes physiques ; symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique........... 53

P. CURIE. — Sur la possibilité d'existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre.................................... 76

SÉANCE DU 2 FÉVRIER 1894 78

PAUL BARY. — Sur les indices de réfraction des dissolutions salines.. 78

ANDRÉ BROCA. — Études théoriques et expérimentales sur les sensations visuelles et la Photométrie.............................. 81

SÉANCE DU 16 FÉVRIER 1894.................................... 93

H. PELLAT. — Du point d'application des forces électromagnétiques. 93

H. DUFET. — Indices du spath d'Islande. — Discussion des résultats.................................... 95

D'ARSONVAL. — Machine électrostatique Bonetti 96

SÉANCE DU 2 MARS 1894.................................... 96

MAUMENÉ. — Sur l'influence de la gravitation dans les actions chimiques 98

D'ARSONVAL. — Moteur à pétrole système Daimler construit par MM. Panhard et Levassor 99

J. DE KOWALSKI. — Sur l'analogie entre l'état gazeux et les dissolutions et la théorie de l'ionisation.................................... 99

SÉANCE DU 16 MARS 1894.................................... 100

H. PELLAT. — Du point d'application des forces électromagnétiques. 100

Pages.

Capitaine Colson. — Pendule gradué pour la mesure des durées de pose en Photographie ... 102
E.-H. Amagat. — Sur la pression intérieure dans les fluides et la forme de la fonction $\varphi(pvt) = 0$ ... 103

SÉANCE ANNUELLE : Réunion des mardi 27 et mercredi 28 mars 1894. 113
André Broca. — Sur le rendement de l'œil et les conditions de meilleure distinction de deux plages colorées ... 119
Georges Meslin. — Sur la constitution des ondes paragéniques de diffraction et les franges des réseaux parallèles ... 132
Sosnowski. — Sur la turbine *de Laval* ... 147
Ch.-Ed. Guillaume. — Application du principe de Doppler à l'énergie des radiations ... 161

SÉANCE DU 20 AVRIL 1894 ... 166
P. Curie. — Propriétés magnétiques du fer doux à diverses températures ... 167
H. Le Chatelier. — Remarques sur la communication de M. Curie. 167
E. Bouty. — Sur la capacité électrique du mercure et les capacités de polarisation en général ... 169
E. Bouty. — Sur les capacités de polarisation ... 172
Clementisch de Engelmeyer. — Cinégraphe ... 186

SÉANCE DU 4 MAI 1894 ... 189
P. Janet. — Sur une méthode d'inscription électro-chimique des courants alternatifs ... 192
Edm. Van Aubel. — Sur la résistance électrique de quelques alliages nouveaux ... 197
G. Wyrouboff. — Sur un nouveau corps à double pouvoir rotatoire. 200

SÉANCE DU 18 MAI 1894 ... 203
E. Hospitalier. — Générateurs et transformateurs polymorphiques d'énergie électrique ... 203

SÉANCE DU 1er JUIN 1894 ... 208
Ch.-Ed. Guillaume. — Expériences de M. Lenard sur les rayons cathodiques ... 211
Violle. — Baromètre de M. Hémot ... 213
Gréhant. — Chauffage et ventilation ... 213
H. Abraham. — Les courants alternatifs de grande fréquence et le pont de Wheatstone ... 213

SÉANCE DU 15 JUIN 1894 ... 219
Decœur. — Sur le bélier hydraulique ... 221

